



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV AUTOMOBILNÍHO A DOPRAVNÍHO INŽENÝRSTVÍ

INSTITUTE OF AUTOMOTIVE ENGINEERING

## HCCI MOTORY

HCCI ENGINES

## BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

## AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Pavel Otáhalík

## VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

prof. Ing. Josef Štětina, Ph.D.

BRNO 2021



# Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav automobilního a dopravního inženýrství  
Student: **Pavel Otáhalík**  
Studijní program: Strojírenství  
Studijní obor: Základy strojního inženýrství  
Vedoucí práce: **prof. Ing. Josef Štětina, Ph.D.**  
Akademický rok: 2020/21

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

## HCCI motory

### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Základní typy motorů podle způsobu zapálení a hoření směsi paliva se vzduchem jsou zážehové a vznětové. Každý z těchto typů má své výhody a nevýhody. Nová kategorie způsobu hoření směsi ve válci se nejčastěji označuje HCCI nebo SPCCI a měla by přinášet výhody obou. Český název pro tento způsob spalování ještě nebyl definován.

### Cíle bakalářské práce:

V práci by měly být popsány standardní způsoby tvorby směsi a spalování u zážehových a vznětových motorů se zdůrazněním výhod a nevýhod. Dále by mělo být popsáno řešení tvorby směsi a její zapálení u motorů HCCI. HCCI motory z pohledu spotřeby paliva a vzniku emisí. Práce by měla zahrnovat příklady současných řešení. Provést diskusi nad získanými poznatky.

### Seznam doporučené literatury:

KIRKPATRICK, Allan T. a FERGUSON, Colin R. Internal combustion engines: applied thermosciences. Third. United Kingdom: John Wiley, 2016. ISBN 978-1-118-53331-4.

MACEK, Jan. Spalovací motory. 2. vyd. V Praze: České vysoké učení technické, 2012. ISBN 978-8-01-05015-6.

STONE, R. Introduction to internal combustion engines. 4th ed. Basingstoke: Palgrave Macmillan, c2012. ISBN 978-0-230-57663-6.

ZHAO, Hua, ed. HCCI and CAI engines for automotive industry. 1. New York: CRC Press, 2007. ISBN 978-1-4200-4459-1.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2020/21

V Brně, dne

L. S.

---

prof. Ing. Josef Štětina, Ph.D.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

## ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá problematikou motorů HCCI. Z důvodu pozdější potřeby znalosti základních principů je začátek práce věnován historii spalovacích motorů, principu jejich fungování a rozdělení těchto motorů podle základních kritérií. Další část obsahuje popis zážehových a vznětových motorů z hlediska principu tvorby směsi a jejího spalování se zdůrazněním jejich výhod a nevýhod. V hlavní kapitole práce, která je zaměřena na motory HCCI, jsou popsány způsoby tvorby směsi a její zapálení. Dále jsou motory HCCI popsány z hlediska vzniku emisí a jsou zahrnuty koncepty a současná řešení. Závěrem je pak úvaha o budoucnosti spalovacích motorů a případných alternativních pohonech.

## KLÍČOVÁ SLOVA

HCCI, zážehový motor, vznětový motor, tvorba směsi, spalování, spalovací motor, emise, SPCCI, Skyactiv-X

## ABSTRACT

This bachelor thesis deals with the problematics of HCCI engines. Due to later required knowledge of fundamental principles, the beginning of the thesis is devoted to the history of combustion engines, the principle of their function and their division by basic criteria. The following section consists of the description of petrol and diesel engines in terms of the principle of the mixture formation and its combustion with emphasis on their advantages and disadvantages. In the central part of the thesis, which focuses on the HCCI engines, various mixtures creation methods and ignition are described. Next, the HCCI engines are described in terms of emissions including current concepts solutions. Finally, the conclusion of the thesis consists of speculation of the future of combustion engines and their prospective alternatives.

## KEYWORDS

HCCI, petrol engine, diesel engine, mixture formation, combustion, combustion engine, emissions, SPCCI, Skyactiv-X

## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

OTÁHALÍK, Pavel. *HCCI motory*. Brno, 2021. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/132512>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automobilního a dopravního inženýrství. 54 s. Vedoucí práce Josef Štětina.

## ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením prof. Ing. Josefa Štětiny, Ph.D. a s použitím informačních zdrojů uvedených v seznamu.

V Brně dne 19. května 2021

.....

Pavel Otáhalík

## PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce, prof. Ing. Josefu Štětinovi, Ph.D., za ochotu a užitečné rady, které mi pomáhaly při psaní této práce.



# OBSAH

<b>Úvod.....</b>	<b>10</b>
<b>1 Rozdělení a popis funkce spalovacích motorů.....</b>	<b>11</b>
1.1 Historie spalovacích motorů.....	11
1.2 Princip činnosti spalovacího motoru.....	12
1.3 Rozdělení podle typu paliva.....	13
1.4 Rozdělení podle tvorby směsi paliva se vzduchem .....	14
1.5 Rozdělení podle způsobu zapálení směsi .....	14
1.6 Rozdělení podle způsobu činnosti .....	14
1.6.1 Dvoudobý motor.....	14
1.6.2 Čtyřdobý motor .....	15
<b>2 Zážehový motor.....</b>	<b>18</b>
2.1 Tvorba směsi .....	18
2.1.1 Karburátor .....	19
2.1.2 Elektronické vstřikování paliva .....	20
2.2 Spalování.....	24
2.3 Výhody a nevýhody .....	24
<b>3 Vznětový motor .....</b>	<b>25</b>
3.1 Tvorba směsi .....	25
3.1.1 Nepřímé vstřikování .....	25
3.1.2 Přímé vstřikování.....	25
3.2 Spalování.....	26
3.3 Výhody a nevýhody .....	27
3.4 Porovnání emisí zážehového a vznětového motoru.....	27
<b>4 Motor HCCI .....</b>	<b>29</b>
4.1 Princip fungování HCCI motoru .....	29
4.2 Tvorba směsi .....	30
4.2.1 Vnější tvorba směsi.....	30
4.2.2 Vnitřní tvorba směsi.....	31
4.3 Spalování.....	33
4.3.1 Parametry pro řízení spalování.....	34
4.4 Emise.....	37
4.5 Koncepty a současná řešení.....	39
4.5.1 Benzinové HCCI motory .....	39
4.5.2 Naftové HCCI motory.....	41
4.5.3 Motor Caterpillar 3401 E .....	43
4.5.4 Motor Skyactiv-X .....	44
<b>Závěr .....</b>	<b>48</b>
<b>Seznam použitých zkratk a symbolů .....</b>	<b>53</b>

## Úvod

Historie spalovacích motorů sahá do 19. století, kdy byl vyvinut čtyřdobý spalovací motor. V průběhu let se výrazně zvyšovala poptávka po automobilech, což mělo za následek vývoj nových technologií v oblasti spalovacích motorů. V minulosti se vývojáři spalovacích motorů zaměřovali především na to, aby měly motory co možná největší výkon, přičemž se příliš nehledělo na ekologické hledisko. V posledních desetiletích se však kvůli klimatickým změnám začal klást na ekologii velký význam. Nejdůležitějšími faktory při vývoji spalovacích motorů se stala spotřeba paliva a množství vypouštěných emisí. Byly nastaveny přísné emisní limity, které se postupně zpřísnují. Aby spalovací motory tyto emisní normy mohly plnit, prošly velkým vývojem. Byly vyvinuty nové technologie, díky kterým dosahují motory vyššího výkonu při současně lepší spotřebě a nižších emisích. Od mechanického vstřikování se přešlo k elektronickému a následně ke vstřikování přímému. Dalšími současnými trendy jsou přeplňování motorů, snižování zdvihového objemu (známe pod pojmem downsizing), vývoj nových materiálů, s ním spojené snižování tření a další. V dnešní době se většina výrobců zaměřuje také na vývoj hybridů, alternativních pohonů nebo plně elektrických automobilů.

Pro zvýšení účinnosti motoru je nutné, aby palivo bylo pokud možno co nejlépe spáleno a byla tak maximálně využita jeho energie. Tato bakalářská práce se zabývá technologií HCCI, která má potenciál při dalším vývoji spalovacího motoru, protože slibuje snížení spotřeby paliva a množství vypouštěných emisí při současně vyšším výkonu a točivém momentu motoru. V úvodní kapitole je stručně popsána historie spalovacích motorů a jejich princip fungování. Dále je práce zaměřená na vysvětlení procesu tvorby směsi u zážehových a vznětových motorů a jejich srovnání, protože tyto principy jsou zásadní pro pochopení technologie HCCI. Následující kapitola je věnována problematice HCCI motorů, přičemž důraz je kladen na způsob tvorby směsi, spalování a také na produkované emise. V poslední části jsou uvedeny koncepty HCCI motorů, na kterých byl tento druh spalování zkoumán a na závěr také popsána současná řešení.

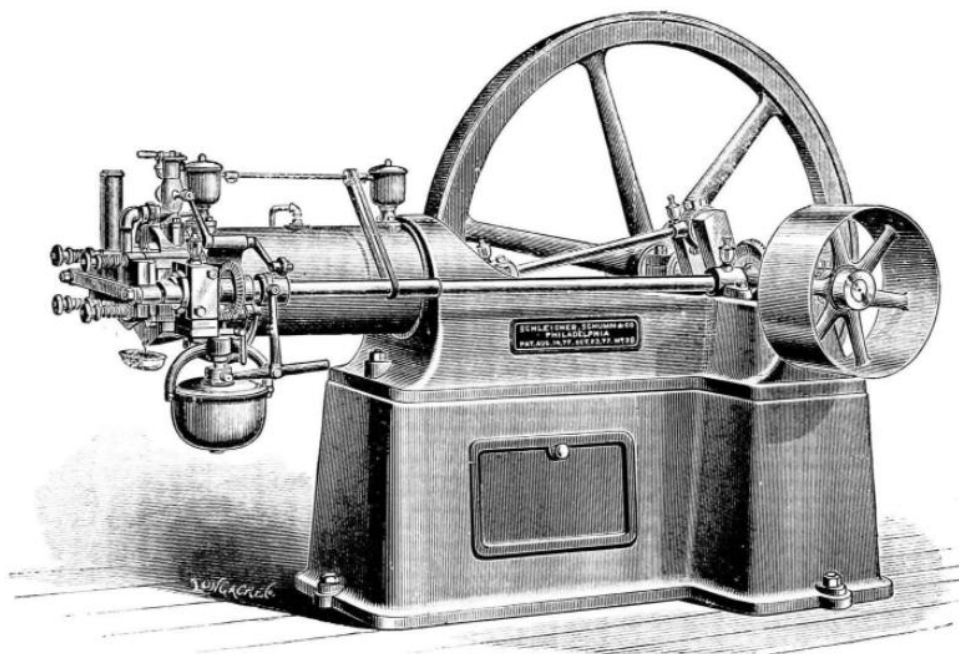
Mým cílem je vytvořit přehled informací o motorech HCCI, vysvětlit jejich fungování, popsat jejich výhody a nevýhody a porovnat je s motory zážehovými a vznětovými. Tento soubor informací může být užitečný pro člověka, který tyto informace hledá, protože v současné době neexistuje podobný přehled v českém jazyce a často není jednoduché informace o tomto tématu najít.

# 1 ROZDĚLENÍ A POPIS FUNKCE SPALOVACÍCH MOTORŮ

Spalovací motor je tepelný stroj, ve kterém dochází ke spalování směsi paliva se vzduchem. Vzniklá chemická energie se převádí na mechanickou práci, která se využívá k pohonu různých strojů. Spalovací motory nalézají uplatnění především v dopravních prostředcích jako jsou automobily, motocykly, lodě, letadla a další stavební a zemědělské stroje.

## 1.1 HISTORIE SPALOVACÍCH MOTORŮ

Vývoj spalovacích motorů začíná v 18. století. Prvního velkého úspěchu dosáhl se svým návrhem spalovacího motoru Francouz Jean Joseph Etienne Lenoir, který v roce 1859 získal patent na motor poháněný svítiplymem. Na něj navázal německý inženýr Nicolaus Otto, který v roce 1864 založil první továrnu na motory na světě. Znám je však především svým patentem na čtyřtákní motor se zvýšeným kompresním poměrem, dnes označován jako „Ottův motor“ (obr. 1), který byl základem pro stavbu pozdějších spalovacích motorů [1].



*Obr. 1 Ottův čtyřtákní spalovací motor [2]*

Otto však chtěl vynalézt také motor dvoudobý, což se mu ovšem nepovedlo. Navázal na něj další slavný konstruktér Karl Benz, který dvoudobý plynový spalovací motor sestrojil. Proslavil se však zejména vynálezem prvního automobilu – tříkolého vozidla (obr. 2) se čtyřtákním motorem na ligroin (lehký benzín), který dokázal při zkušební jízdě ujet přes 120 kilometrů. Ottovy motory byly těžké a málo výkonné. Gottlieb Daimler dokázal vylepšením zapalování zvýšit otáčky motoru a tím i výkon. Další vylepšení přišlo, když Wilhelm Maybach vynalezl první karburátor [1].



Obr. 2 Tříkolový automobil Karl Benz [3]

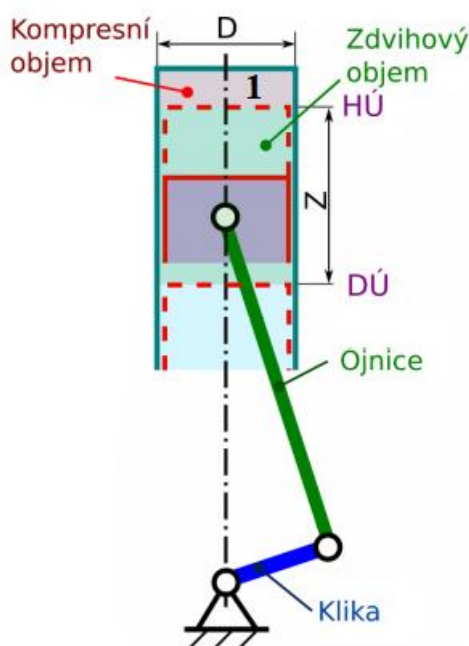
První vznětový motor si nechal patentovat Rudolf Diesel v roce 1892. Za 5 let představil funkční motor spalující naftu, který měl účinnost kolem dvaceti šesti procent, což bylo téměř dvakrát víc než neúčinnější parní stroje z té doby. Použití vznětových motorů v automobilech bránila jejich vysoká hmotnost a velikost, ale díky jejich nízké spotřebě paliva byly používány v lodní a železniční dopravě. V roce 1910 bylo patentováno hydraulické vstřikování, které nahradilo kompresor a umožnilo snížení hmotnosti a zmenšení rozměrů vznětových motorů. To vedlo k jejich nasazení také v automobilovém průmyslu [1].

## 1.2 PRINCIP ČINNOSTI SPALOVACÍHO MOTORU

Na píst působí velký tlak, který vzniká po zapálení směsi ve spalovacím prostoru (obr. 3 oblast 1). Pro správnou funkci je nutné, aby byl spalovací prostor dokonale utěsněn. Tlak působící na píst ho translačně posouvá. Posuvný pohyb nemůžeme použít přímo pro pohon dopravních prostředků a strojů, protože je téměř vždy potřeba pohyb rotační (pro pohon kol, popřípadě hřídelí různých strojů). To, aby se píst vrátil do výchozí polohy a přímočarý pohyb se mohl opakovat, zabezpečuje klikový mechanismus. Translační pohyb se ojnici přenáší na klikový hřídel, a tím se změní pohyb na rotační. Otáčivý pohyb klikové hřídele se přenáší přes převodovku a hřídele na kola. Pohyb pístu je ohraničen polohami, kdy jsou ojnice i klika ve svislém směru. Poloha pístu s nejmenším objemem spalovacího prostoru se nazývá horní úvrať (obr. 3 HÚ) a poloha s největším objemem se nazývá dolní úvrať (obr. 3 DÚ). V HÚ je píst nejdál od osy klikového hřídele a v DÚ naopak nejbližší. Celá válcová jednotka (obr. 3) má několik charakteristických rozměrů. Průměr pístu má prakticky stejnou hodnotu jako průměr válce a nazývá se vrtáním  $D$ . Při translačním pohybu pístu se vzdálenost mezi mezními hodnotami horní úvrátě a dolní úvrátě nazývá zdvih  $Z$ . Objem válce je tedy součin zdvihu  $Z$  a vrtání  $D$  a zpravidla se označuje zdvihový objem  $V_z$ . Maximální stlačení (komprese) nastává, když je píst v HÚ. V této poloze je uzavřený objem nad pístem minimální a nazýváme ho jako kompresní objem  $V_k$ . Pomocí těchto dvou objemů zavádíme veličinou zvanou kompresní poměr. Zpravidla ho značíme  $\epsilon$  a je to poměr celkového objemu  $V_c$  a kompresního objemu  $V_k$  [4]. Vyjadřuje míru komprese (stlačení) a platí pro něj následující vztah:

$$\varepsilon = \frac{V_c}{V_k} = \frac{V_k + V_z}{V_k} \quad (1)$$

Aby motor správně fungoval, musí mít všechny součástky klikového mechanismu velkou rozměrovou a teplotní stálost. Při chodu spalovacího motoru se uvolňuje velké množství tepla ze spalování a je důležité motor chladit, protože jinak by došlo k jeho přehřátí a poškození.



Obr. 3 Schéma klikového mechanismu [4]

### 1.3 ROZDĚLENÍ PODLE TYPU PALIVA

Na základě druhu paliva dělíme motory na dvě základní skupiny [5]:

#### MOTORY NA KAPALNÁ PALIVA

- ropná lehko odpařitelná paliva (benzín, petrolej)
- ropná těžko odpařitelná paliva (nafta, mazut)
- paliva s neropným původem (etanol, rostlinné oleje)
- směsná paliva (nafta s metylesterem řepkového oleje, lihobenzín)

#### MOTORY NA PLYNNÁ PALIVA

- propan – butan
- zemní plyn

#### MOTORY NA DVOJÍ PALIVA

- benzín a zemní plyn
- nafta a zemní plyn
- bioplyn a nafta

## 1.4 ROZDĚLENÍ PODLE TVORBY SMĚSI PALIVA SE VZDUCHEM

Na základě způsobu tvorby směsi se vzduchem můžeme motory dělit na [5]:

- vnitřní – tvorba směsi probíhá ve spalovacím prostoru (palivo vstřikováno do válce – přímé vstřikování)
- vnější – tvorba směsi paliva se vzduchem probíhá mimo prostor válce

## 1.5 ROZDĚLENÍ PODLE ZPŮSOBU ZAPÁLENÍ SMĚSI

Podle způsobu zapálení směsi dělíme motory na [5]:

- zážehové – na benzín, zapálení směsi jiskrou ze svíčky
- vznětové – na naftu, vznícení směsi kompresí

Podkapitoly 1.4 a 1.5 budou podrobně zpracovány v příslušných kapitolách.

## 1.6 ROZDĚLENÍ PODLE ZPŮSOBU ČINNOSTI

Podle způsobu výměny náplně válců (podle počtu zdvihů na jeden pracovní cyklus motoru) dělíme motory na [5]:

- dvoudobý motor
- čtyřdobý motor

### 1.6.1 DVOUDOBÝ MOTOR

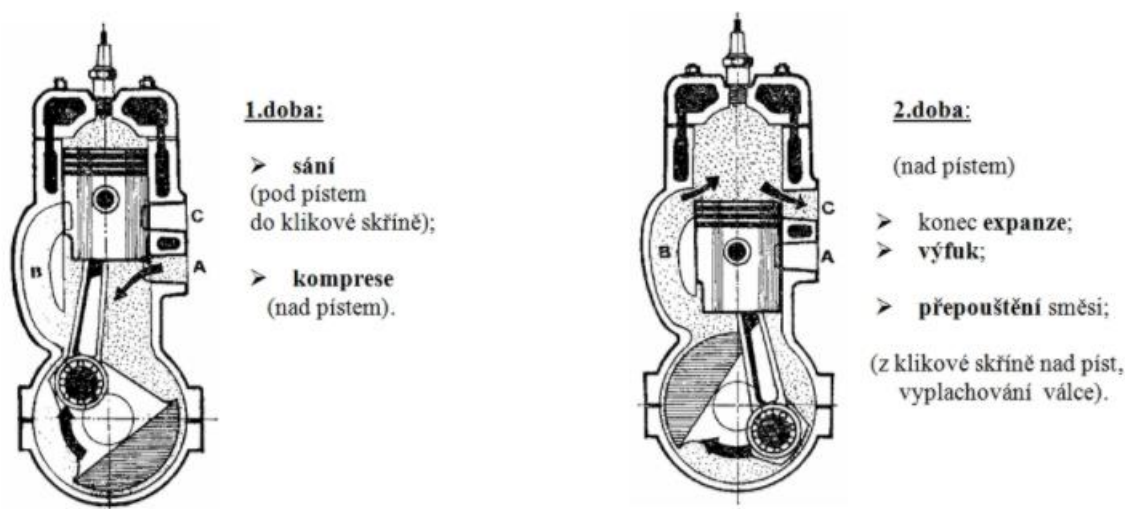
Pro pracovní cyklus dvoudobých motorů je potřeba pouze jedna otáčka klikového hřídele. Během dvou zdvihů proběhnou čtyři pracovní fáze motoru. Přívod zápalné směsi obstarávají kanály v bočních stěnách válce, které jsou otvírány a zavírány pohybujícím se pístem. Mazání je obstaráváno olejem přimíchaným do paliva. Nepoužívá se tlakové oběhové mazání, protože na cyklu motoru se podílí kliková skříň i spodní plocha pístu. Oproti čtyřdobým motorům má dvoudobý motor dvojnásobný počet pracovních cyklů na jednu otáčku klikového hřídele. Proto mají vyšší měrný výkon, ale nižší účinnost, neboť je zkrácena doba expanze a komprese, aby mohlo proběhnout také sání a výfuk. Pracovní fáze jsou dvě (obr. 4) [6]:

#### 1. DOBA (SÁNÍ A KOMPRESI)

Píst se pohybuje z dolní úvratě nahoru. Během pohybu se plyn ve válci stlačuje (kanál nad pístem je zavřený), naopak objem klikové skříně se zvětšuje. Tím se vytvoří podtlak, který způsobí nasátí palivové směsi do prostoru klikové skříně. Těsně před dosažením horní úvratě dochází k zapálení směsi u zážehových motorů. U dieselových dvoudobých motorů se do stlačeného vzduchu vstříkuje nafta a hoření trvá delší dobu [6].

#### 2. DOBA (EXPANZE A VÝFUK)

Hořící a expandující směs tlačí píst zpět směrem dolů. Při tomto pohybu se zmenšuje objem klikové skříně a po zavření sacího kanálu se směs začne stlačovat. V průběhu 2. doby se otevře výfukový kanál, kterým výfukové plyny opouštějí motor. Jsou vypláchnuty čerstvou směsí, která proudí přepouštěcím kanálem do spalovacího prostoru. Píst se pohybuje nahoru, výfukový kanál se zavírá a začíná další cyklus [6].



Obr. 4 Pracovní cyklus dvoudobého motoru [7]

### VÝHODY A NEVÝHODY

Výhody:

- absence rozvodů – prakticky neomezené rozpětí otáček a jednodušší konstrukce
- nižší hmotnost
- vyšší měrný výkon
- rychlá reakce na přidání plynu
- nižší výrobní cena

Nevýhody:

- větší spotřeba paliva a oleje
- nedokonalé spalování
- horší emise
- rychlejší opotřebení
- vyšší hlučnost

Uvedené v porovnání se čtyřdobými motory [6].

Dvoudobé motory se díky jejich lehké konstrukci a jednoduchosti používají často v zahradní technice (motorové pily, křovinořezy). Dále také ve skútrech a výkonných terénních motocyklech. V minulosti, kdy se ještě příliš neřešila ekologie, se používaly v automobilech (Wartburg, Trabant) i v motocyklech (Jawa, Simson, MZ).

### 1.6.2 ČTYŘDOBÝ MOTOR

Čtyřdobý motor je dnes nejběžnějším typem motoru pro automobilovou dopravu. Pro jeden pracovní cyklus čtyřdobého motoru jsou potřeba dvě otáčky klikového hřídele, takže píst provede dva úplné průchody ve válci, aby dokončil jeden pracovní cyklus. Dva průchody znamenají čtyři odlišné zdvihy, kterým říkáme doby. Jsou jimi: sání, komprese (stlačování), expanze (výbuch) a výfuk. Často se cyklus pro lepší pochopení zjednodušuje tak, že 1 doba trvá polovinu otáčky klikového hřídele (jednotlivé zdvihy začínají a končí vždy v horní a dolní úvratí pístu). Ve skutečnosti ale řídí začátek a konec jednotlivých dob několik faktorů. Mezi ně

patří například okamžik vstřiku paliva, okamžik zážehu a otevírání a zavírání ventilů. Mazání čtyřdobého motoru není obstaráváno přimícháním oleje do paliva, jako u motorů dvoudobých, ale používá se takzvané tlakové oběhové mazání. Zásobník oleje je ve spodní části klikové skříně, která je kryta olejovou vanou. Čerpadlo nasává olej, který je z vany přes olejový filtr pod tlakem rozváděn do všech mazacích míst v motoru. Celý pracovní oběh čtyřdobého motoru probíhá pouze nad pístem. Pracovní doby čtyřdobého motoru jsou tedy čtyři (obr. 5).

### **1. DOBA (SÁNÍ)**

Při sání se plní směs paliva se vzduchem do spalovací komory. Píst se pohybuje z horní úvrati do dolní a tento pohyb vytváří ve válci podtlak. Díky tomu se otevřeným sacím ventilem nasává směs do válce. Sací ventil zůstává otevřený i chvíli po dosažení dolní úvrati, když už se píst začíná pohybovat nahoru. Palivo ještě setrvačností proudí do válce. V závislosti na konstrukci motoru zůstává sací ventil otevřený několik úhlových stupňů rotace klikové hřídele po dosažení pístu dolní úvrati. Na konci první doby se sací ventil uzavírá a tím utěsní směs paliva se vzduchem ve válci [8].

### **2. DOBA (KOMPRESE – STLAČOVÁNÍ)**

Píst se pohybuje nahoru a směs paliva se vzduchem je stlačována uvnitř válce. Stlačování směsi zajistí, že se při zapálení směsi uvolní více energie. Sací i výfukové ventily musí být uzavřeny, aby bylo zajištěno dokonalé utěsnění. Hybnost potřebnou ke stlačení směsi pomáhá udržet setrvačnick. Stlačování směsi zároveň vede k jejímu zahřívání. To společně umožní její rychlejší spálení. Kapičky paliva se působením tlaku a tepla odpařují a z paliva vznikají páry [8].

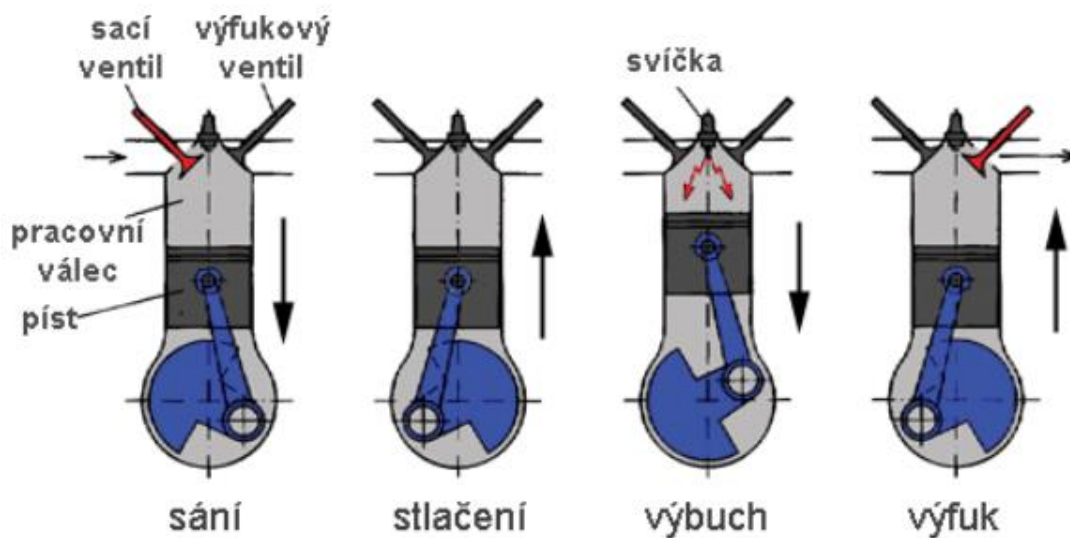
### **3. DOBA (EXPANZE – VÝBUCH)**

Ve vhodném okamžiku před dosažením horní úvrati je směs zažehnuta svíčkou u zážehového motoru, případně se sama vznítí u vznětového motoru. Po zapálení směsi vznikne chemickou reakcí tepelná energie. Horké plyny se rozpínají a tlačí píst směrem dolů k dolní úvrati od hlavy válce. Pohybující se píst působí na ojnici a ta pohání klikový hřídel. Během expanze jsou oba ventily zavřené [8].

### **4. VÝFUK**

Výfukový ventil se otevírá už těsně před dosažením dolní úvrati. Když píst dosáhne dolní úvrati a spalování je dokončeno, otevírá se výfukový ventil. S pomocí setrvačnicku se píst pohybuje nahoru a otevřeným výfukovým ventilem vytlačuje ven z válce výfukové plyny. Sací ventil je v průběhu výfuku zavřený, otevírá se těsně před dosažením horní úvrati a začíná jím proudit nová směs do válce. Dosažením horní úvrati je dokončen jeden pracovní cyklus čtyřdobého motoru. Výfukový ventil se zavírá chvíli potom, co píst dosáhne horní úvrati [8].





Obr. 5 Pracovní cyklus čtyřdobého motoru [9]

### VÝHODY A NEVÝHODY

Výhody:

- čtyřdobé motory produkují víc točivého momentu v nižších otáčkách
- mají nižší spotřebu paliva (spotřebovává se jednou za 4 doby)
- mají čistší emise výfukových plynů, protože se nepálí olej s palivem jako u dvoudobých motorů
- lepší odolnost a výdrž (jsou navrženy pro nižší otáčky než motory dvoudobé)

Nevýhody:

- složitější konstrukce (ventily potřebují pro pohon rozvody)
- vyšší cena a dražší servis
- nižší měrný výkon

Uvedené výhody a nevýhody jsou v porovnání s dvoudobými motory.

Čtyřdobé motory se dnes běžně používají v dopravních prostředcích. Automobilky a konstruktéři se snaží motory vylepšovat, aby byly motory co nejlehčí a nejkompaktnější a zároveň měly co nejvyšší výkon a co nejnižší spotřebu.

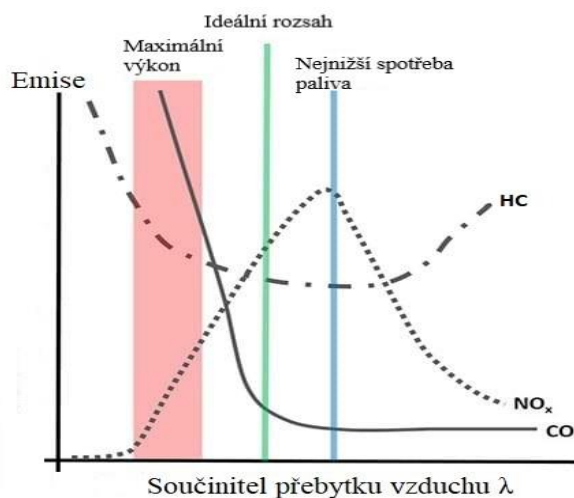
## 2 ZÁŽEHOVÝ MOTOR

Zážehové motory jsou často anglicky označovány jako SI engines (spark-ignition engines), protože palivo je v nich zážehnuto jiskrou ze zapalovací svíčky. Zážehové motory využívají snadno odpařitelná paliva, zpravidla automobilový benzin. Jedná se o směs sloučenin uhlíku (C) a vodíku (H), které jsou sloučeny v určitém poměru a nazýváme je uhlovodíky (HC). V palivovém systému se připravuje směs tak, aby během sání a komprese byla homogenní. Palivo musí být zcela odpařeno a v podobě par dokonale smícháno se vzduchem [10]. U zážehových motorů se směs paliva se vzduchem tvoří v karburátoru nebo v systému vstřikování paliva, které dělíme na nepřímé a přímé vstřikování.

### 2.1 TVORBA SMĚSI

Pro správný proces spalování je zásadní správný poměr paliva (benzínu) a vzduchu. Jedině se správnou směsí motor podává požadovaný výkon. Na složení směsi závisí také emise, spotřeba paliva, rychlost hoření směsi a teplota spalování. Optimální hodnota složení směsi je dána druhem motoru a je určena poměrem hmotnosti paliva a spalovacího vzduchu. Pro zážehové motory spalující benzin je ideální poměr 14,7 kg vzduchu na 1 kg hmotnosti paliva. Tento poměr nazýváme stechiometrický. Pokud je poměr stechiometrický, je teplota hoření nejvyšší, spalování nejúplnější a směs hoří nejrychleji. Když je ve směsi přebytek vzduchu (více než 14,7 kg) a méně paliva, směs je chudá. Naopak, je-li ve směsi přebytek paliva a méně vzduchu, nazýváme ji bohatou [11]. Při reálném spalování je nutné, aby byl ve směsi přebytek vzduchu, jehož množství je určeno především zápalností směsi a dobou hoření. Protože při ideálním a reálném spalování je směs odlišná, byl zaveden součinitel přebytku vzduchu  $\lambda$ , kterým je definován jako poměr skutečně přivedené hmotnosti vzduchu ku teoretické spotřebě vzduchu. Význam velikosti  $\lambda$  je následující [5]:

- $\lambda < 1$  – nedostatek přiváděného vzduchu (označujeme jako tzv. bohatou směs)
- $\lambda = 1$  – hmotnost skutečně přivedeného vzduchu odpovídá teoretické potřebě
- $\lambda > 1$  – přebytek přiváděného vzduchu (tzv. chudá směs). Nastává v rozmezí  $\lambda \in (1,05; 1,3)$  a při této hodnotě  $\lambda$  lze pozorovat snížený výkon a nižší spotřebu paliva
- $\lambda > 1,3$  – směs není schopna zapálení, běh motoru je neklidný, dochází k vynechávání



Obr. 6 Graf závislosti součinitele přebytku vzduchu na složení emisí [12]

Maximální výkon motoru je dosažen při  $\lambda \in (0,85;0,95)$ . Z obr. 6 je zřejmé, že směs nelze složit tak aby měl motor maximální výkon při nejnížší spotřebě paliva a nejnížším množství emisí. V praxi se jako ideální osvědčila hodnota  $\lambda \in (0,9;1,1)$  [5].

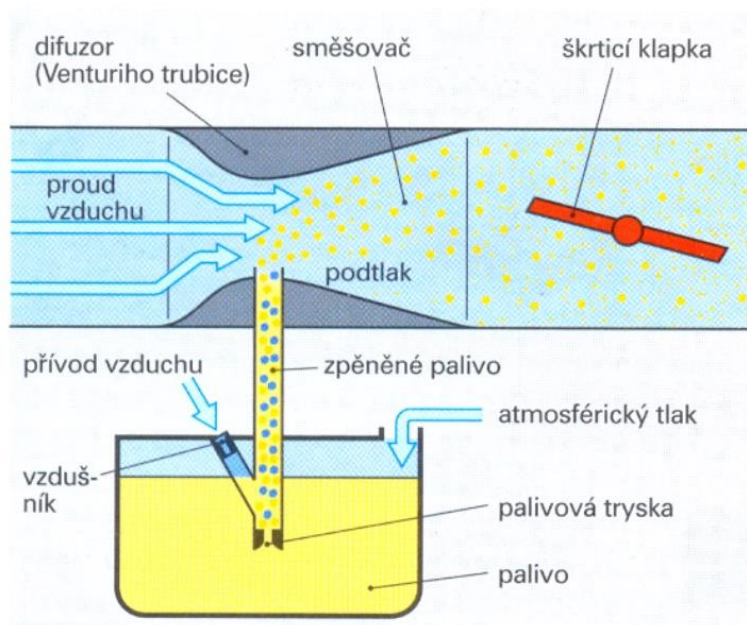
Sešlápnutí plynového pedálu řídí množství nasávaného vzduchu do motoru nebo řídí množství přiváděného paliva. U zážehových motorů s přípravou směsi mimo spalovací prostor se výkon řídí množstvím nasávaného vzduchu. Přímá-vstřikové motory se řídí množstvím vstřikovaného paliva. Správně složení směsi závisí na provozních podmínkách motoru. V sacím potrubí nastavuje množství nasávaného vzduchu škrtící klapka. Aby se docílilo požadovaného složení směsi (závislé na provozních podmínkách motoru), přivádí se podle množství spalovaného vzduchu potřebné množství paliva. Po startu motoru za studena dochází vlivem nízké teploty k silnému smáčení stěn válců a sacího potrubí. Navíc odpařivost paliva je za nízkých teplot nižší. Palivo se hůř mísí s přiváděným vzduchem a směs je chudá. Proto se při studeném startu motoru přivádí přídavné palivo. Při zahřívání motoru část paliva stále kondenzuje na stěnách sacího potrubí, proto je potřeba obohacená směs. Se zvyšující se teplotou se zlepšuje schopnost promísení paliva se vzduchem a jeho odpařování. Jakmile motor dosahuje provozní teploty a běží na volnoběh, je složení směsi stechiometrické. Při jízdě z kopce a tzv. brždění motorem je přívod paliva přerušen. Když je požadován maximální výkon a motor pracuje v plném zatížení (škrtící klapka je plně otevřena), je nutné směs obohacovat, aby bylo možné dosáhnout nejvyššího možného výkonu a kroutícího momentu [11].

### 2.1.1 KARBURÁTOR

Nejstarším systémem pro vnější tvorbu směsi pro zážehové motory byly karburátory. Používaly se prakticky výhradně do osmdesátých let minulého století, poté je začaly nahrazovat elektronicky řízené systémy vstřikování paliva. S nimi dosahují motory nižší spotřeby paliva a emisí a zároveň vyššího výkonu [11]. Až do přelomu tisíciletí byly karburátory hojně využívány v motocyklech a dodnes jsou používány u jednoduchých motorů bez řídicí jednotky. Nasazovány jsou například v zahradních a stavebních strojích, malých motocyklech, skútrech apod.

Karburátor je zařízení, které co možná nejrovnoměrněji rozprašuje palivo, které následně putuje sacím potrubím a sacím kanálem se vzduchem do válce motoru, kde se odpařuje. Tím se zajišťuje, že směs plněná do válců je homogenní a má optimální směšovací poměr  $\lambda$ . Protože karburátory nejsou schopny zajistit přesný směšovací poměr směsi v celém rozsahu otáček motoru, byly nahrazeny elektronicky řízeným vstřikováním paliva [7].

Princip činnosti karburátoru (obr. 7) spočívá v užití Venturiho trubice. Tak nazýváme zúžené místo v sacím potrubí motoru. Toto zúžené místo funguje jako difuzor (díky zúžení se rychlost proudění vzduchu zvyšuje na 80–120 m.s<sup>-1</sup>) a ve zúženém místě vzniká podtlak, který nasává palivo z rozprašovací trubice. Ve směšovači se palivo rozprašuje do vzduchu. Množství paliva, které se mísí se vzduchem je závislé na podtlaku v sacím potrubí. Podtlak se řídí natočením škrtící klapky karburátoru. Aby bylo palivo kvalitněji rozprašeno, přes vzdušník (kalibrováný otvor) se přisává vzduch do tzv. emulzní trubice, ve které vzniká emulze paliva a vzduchu, jež je poté rozprašena v difuzoru. Množství paliva přiváděné do karburátoru je v každé příslušné funkční části omezoвано tryskami a množství přiváděného vzduchu je omezoвано příslušnými vzdušníky. Další částí karburátoru, která ovlivňuje průtok paliva, je plováková komora. Hladinu v ní udržuje plovák, který ovládá jehlový ventil uzávěru. Rozdíl mezi tlaky na hladinu paliva v plovákové komoře a podtlakem v difuzoru ovlivňuje množství dodávaného paliva. Do plovákové komory se přivádí palivo z nádrže čerpadlem [7].



Obr. 7 Schéma principu činnosti karburátoru [13]

Množství směsi je řízeno škrticí klapkou, která je ovládána pedálem plynu. Míra otevření škrticí klapky řídí otáčky motoru.

### 2.1.2 ELEKTRONICKÉ VSTŘIKOVÁNÍ PALIVA

V dnešní době se pro přípravu zápalné směsi využívají moderní vstřikovací systémy. Umožňují přesnou regulaci množství vstřikovaného paliva v závislosti na zatížení motoru a palivo je prostřednictvím vstřikovacích trysek rozprášeno tlakem palivového čerpadla. To má příznivý vliv na spotřebu paliva a snížení množství produkovaných škodlivých emisí, na což je v dnešní době kladem velký důraz. Cena elektronického vstřikování paliva je vyšší než u karburátorů nebo mechanických vstřikovacích systémů. Splnění přísných emisních norem však vyžaduje jeho použití [7].

Od zavedení emisních norem se u zážehových motorů výrazně snížila především produkce oxidu uhelnatého (CO). Oxid uhelnatý vzniká, když ve spalované směsi není dostatek kyslíku a dochází k nedokonalému spalování. Elektronické vstřikování umožnilo vytvářet správnou směs paliva se vzduchem ve všech provozních podmínkách motoru, a tak efektivně snížit produkci oxidu uhelnatého. Činnost elektronického vstřikování paliva řídí řídicí jednotka, která získává informace ze snímačů (snímač množství nasávaného vzduchu, lambda sonda, snímač teploty nasávaného vzduchu, snímač pozice klikového hřídele a dalších). Informace ze snímačů jsou v řídicí jednotce vyhodnocovány a na jejich základě je řízena činnost elektronického vstřikování tak, aby motor produkoval co nejmenší množství emisí [7].

U zážehových motorů rozdělujeme vstřikování na:

- nepřímé – palivo je vstřikováno do sacího potrubí
- přímé – palivo je vstřikováno přímo do válce motoru
- kombinované – v režimu vyššího zatížení motoru funguje jako přímé při nízkém zatížení jako nepřímé vstřikování

### NEPŘÍMÉ VSTŘIKOVÁNÍ

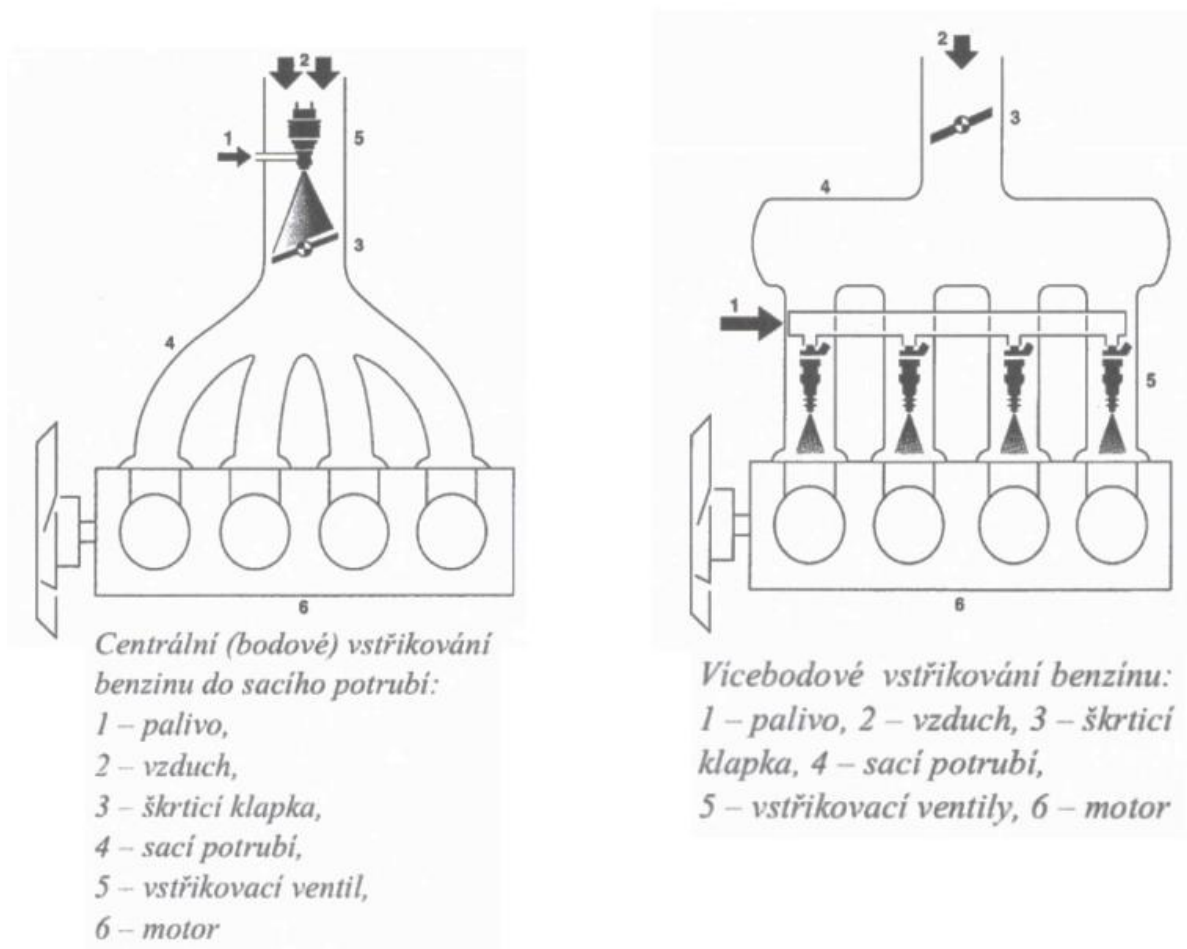
Nepřímé vstřikování může být [7]:

- simultánní – Palivo se vstřikuje jednou za otáčku klikového hřídele (dvakrát za cyklus) ze všech vstřikovacích ventilů najednou.
- skupinové – Vytvořeny dvě skupiny vstřikovacích ventilů, které vstřikují celou dávku paliva, vždy jednou za cyklus. Toto řešení umožňuje načasovat okamžik vstřiku podle provozních podmínek a odstranit nežádoucí vstřikování před otevřením sací ventil.
- sekvenční – Vstřikovací ventily vstřikují palivo v pořadí zapalování válců. Vstřikuje se celá dávka paliva najednou, nebo na vícekrát, a to vždy před začátkem sání. Tato varianta je technicky nejsložitější, ale motory s ní dosahují nejlepších parametrů.

Rozeznáváme dva způsoby vstřikování benzínu – centrální (bodové) vstřikování (obr. 8) a vícebodové vstřikování. Centrální bodové vstřikování (CFI – Central Fuel Injection), někdy také nazýváno jako jednobodové vstřikování (SPI – Single Point Injection), využívá jednoho elektromagnetického vstřikovacího ventilu. Ventil je umístěn nad škrtkou klapkou (odpovídá umístění karburátoru) a vstřikuje přerušovaně dávku paliva, kterou dodává do všech válců. Palivo je do vstřikovacího ventilu dodáváno prostřednictvím palivového čerpadla. Režim práce motoru je určen polohou plynového pedálu (polohou škrtky klapky) a otáčkami motoru. Množství vstřikovaného paliva je závislé na době vstřiku, která se řídí údaji ze snímačů teploty nasávaného vzduchu, chladicí kapaliny a lambda sondy. CFI se používá pro motory s maximálně čtyřmi válci a do výkonu 80 kW. Mezi známé systémy vstřikování CFI řadíme Mono – Jetronic a Mono – Motronic od výrobce Bosch [5].

Vícebodové vstřikování (obr. 8) označované jako MPI (Multi Point Injection) používá jeden vstřikovací ventil pro každý válec motoru. Tím je odstraněna nevýhoda CFI – palivo nekondenzuje na studených stěnách sacího potrubí. Vstřikovače u MPI vstřikují dávku paliva do sacího potrubí pro jednotlivé válce a přímo před sací ventil. Když je sací ventil otevřen, nasávaný vzduch do válce s sebou strhává rozprášené palivo a společně vířením ve válci tvoří homogenní směs. Dobu vstřiku (tedy i množství vstřikovaného paliva) určují snímače hmotnosti nasávaného vzduchu, polohy klikového hřídele, teploty chladicí kapaliny, napětí akumulátoru a lambda sondy. U vstřikování MPI je při brždění motorem přerušena dodávka paliva. Palivo není přiváděno přímo do vstřikovacích ventilů, ale do centrálního zásobníku – railu, ve kterém se udržuje tlak zhruba 1 MPa. Jednotlivé vstřikovací ventily jsou napojeny na tento rail. Příklady vstřikování MPI jsou KE-Jetronic nebo L-Jetronic [5].

Vstřikování jednobodové se dnes již prakticky nepoužívá. Vícebodové vstřikování lze použít u motorů s libovolným počtem válců a motory s ním dosahují nižší spotřeby a většího výkonu díky efektivnějšímu plnění válců.



Obr. 8 Schémata druhů nepřímých vstřikování [5]

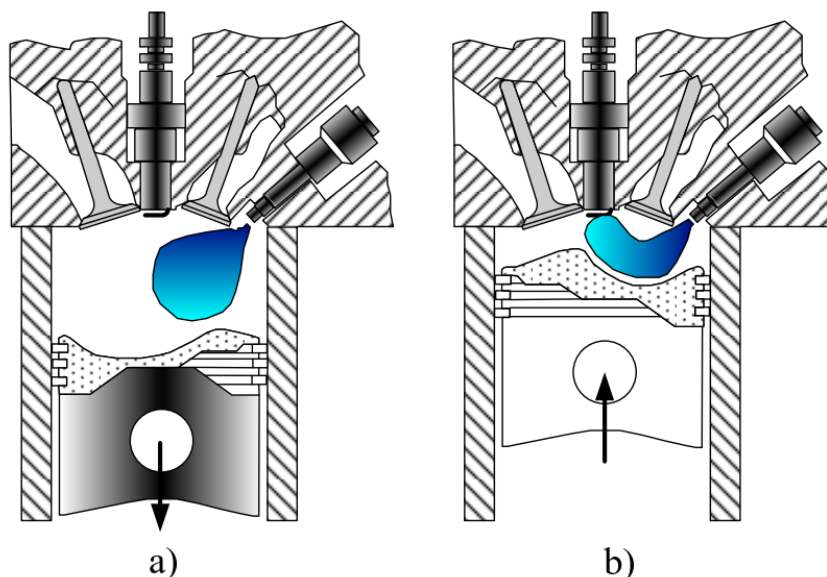
## PŘÍMÉ VSTŘIKOVÁNÍ

Prvním automobilem vybaveným motorem s přímým vstřikem paliva byl Mercedes-Benz 300 SL, představený již v roce 1954. První motor s elektronickým přímým vstřikováním paliva představilo Mitsubishi v roce 1997. Tato technologie byla označována jako GDI (Gasoline Direct Injection). Přímé vstřikování je vícebodové a vysokotlaké. Palivo je pod vysokým tlakem (asi 12 MPa) plněno do tlakového zásobníku (railu), ze kterého je elektromagnetickými ventily ve správný okamžik vstřikováno přímo do spalovací komory, ne před sací ventily jako u vstřikování nepřímého. Zážehové motory s přímým vstřikováním dosahují nižších emisí  $\text{CO}_2$ , o zhruba 20 % nižší spotřeby paliva a jsou schopny dosahovat vyššího výkonu než motory s nepřímým vstřikováním [10].

Motory s přímým vstřikováním pracují ve dvou režimech (obr. 9) – provoz s vrstveným plněním a homogenní provoz. Úkolem vstřikování je tvorba pokud možno homogenní směsi paliva se vzduchem. Taková směs může být vytvořena, pokud se veškeré palivo odpaří. Na odpařování má vliv několik faktorů, hlavními jsou teplota ve spalovacím prostoru, čas na odpaření a velikost kapek vstřikovaného paliva. Ta je závislá na tlaku ve spalovacím prostoru a vstřikovacím tlaku. Čím je vstřikovací tlak vyšší, tím rychleji se kapičky odpařují. S vyšším vstřikovacím tlakem se rovněž zvyšuje hloubka pronikání (vzdálenost, kterou kapka paliva urazí, než se celá odpaří). Pokud je vzdálenost větší než vzdálenost vstřikovací trysky od stěny



spalovacího prostoru, dochází ke smáčení stěny palivem. Když se palivo ze stěny spalovací komory neodpaří před okamžikem zážehu, dochází k nedokonalému spalování [1].



Obr. 9 Tvorba směsi u přímého vstřikování – a) homogenní provoz,  
b) provoz s vrstevnatým plněním [14]

Když je požadován vysoký výkon a vysoký točivý moment, pracuje motor v režimu homogenního provozu. Směs je v tomto režimu stechiometrická ( $\lambda = 1$ ), nebo ve výjimečných případech je  $\lambda < 1$ . Palivo je vstřikováno v době sání motoru a je jemně rozprášeno přičemž k tvorbě homogenní směsi se využívá celý spalovací prostor. Vstřikované palivo zároveň chladí spalovací komoru. V tomto režimu se vstřikuje větší množství paliva než v režimu homogenního provozu s chudou směsí [10].

Při typu provozu s vrstevnatým plněním pracuje motor při nižším točivém momentu a nižších otáčkách (asi do 3000 min<sup>-1</sup>). Palivo se vstřikuje při kompresním zdvihu těsně před zažehnutím a z důvodu krátké doby mezi vstřikem a zážehem se nevytvoří homogenní směs v celém spalovacím prostoru. Proudění vzduchu ve válci přesouvá směs paliva se vzduchem k zapalovací svíčke. Homogenní směs se tvoří pouze v blízkosti zapalovací svíčky. Díky tomu po zážehu hoří homogenním plamenem, přestože je velmi chudá. Kvůli velkému přebytku vzduchu vzniká při spalování vysoké množství oxidů dusíku (NO<sub>x</sub>). To je nutné kompenzovat recirkulací spalín (zpětně přiváděné spaliny snižují teplotu spalování a tím emise NO<sub>x</sub>) [1]. Provoz s vrstevnatým plněním je limitován otáčkami a točivým momentem. Když je točivý moment příliš vysoký, zvyšuje se produkce sazí. Při příliš vysokých otáčkách nelze díky vysokým turbulencím ve válci zajistit transport směsi k zapalovací svíčke [1].

Pro přechod mezi režimem homogenním a režimem s vrstevnatým plněním se používá chudá směs ( $\lambda < 1,5$ ). Vstřikování paliva je rozděleno do dvou fází. Nejprve se v době sání vstřikuje část paliva a tvoří se homogenní chudá směs. Ve druhé fázi se vstřikuje palivo těsně před koncem komprese, aby se zajistilo spolehlivé zapálení chudé směsi. Náchylnost k detonačnímu spalování je při dvojitým vstřiku nižší, proto lze použít vyšší kompresní poměr. Při dvojitým vstřikování motor dosahuje nižší spotřeby paliva a produkce emisí [10].

## 2.2 SPALOVÁNÍ

Spalování paliva probíhá ve velmi krátkém čase. Rychlost hoření směsi ovlivňují tlak, teplota, okamžik zapálení, složení směsi a způsob pohybu náplně ve válci. Ve spalovacím prostoru je na konci komprese homogenní směs. Připravená směs je zažehnuta elektrickou jiskrou a vytvoří se hořící vrstva, která se šíří spalovacím prostorem rychlostí 20 až 60 m·s<sup>-1</sup> po soustředných kulových plochách. Tento průběh spalování je označován jako normální [5].

Kromě normálního spalování však může mít spalování i abnormální průběh, který nazýváme detonační hoření, často označované jako klepání (projevuje se kovovým zvukem). Detonační hoření vzniká z důvodu vysoké teploty spalovacího prostoru, chybně nastaveného předstihu zážehu, případně použití paliva s nízkým oktanovým číslem. Vyznačuje se abnormálně rychlým spalováním, jehož rychlost odpovídá detonaci (rychlost hoření dosahuje až 2000 m·s<sup>-1</sup>). Při detonačním hoření dochází k samovznícení směsi (není zažehnuta svíčkou). Vzniká tlaková vlna, která naráží na stěny spalovacího prostoru. V důsledku toho může dojít k mechanickému poškození částí motoru [5]. K detonačnímu spalování často dochází při použití paliva s nižším oktanovým číslem, než doporučuje výrobce motoru. Motory s vyšším kompresním poměrem vyžadují použití paliva s vyšším oktanovým číslem, protože tyto paliva mají vyšší odolnost proti samozápalům.

## 2.3 VÝHODY A NEVÝHODY

Zážehové motory mají v porovnání se vznětovými jisté výhody a nevýhody [15]:

### VÝHODY

- nižší pořizovací cena (konstrukce zážehových motorů je méně náročná na výrobu)
- nižší hlučnost a vibrace
- nižší náklady na opravy a údržbu
- snadnější startování při nízkých teplotách, díky lepším vlastnostem benzínu za nízkých teplot

### NEVÝHODY

- nižší účinnost (vyšší spotřeba paliva)
- vyšší produkce emisí CO<sub>2</sub>
- vyšší cena paliva (v současné době)
- nižší výkon a točivý moment v nízkých otáčkách
- zpravidla nižší životnost než motory vznětové



### 3 VZNĚTOVÝ MOTOR

Vznětové motory jsou často označovány jako CI engines (z anglického compression-ignition engines). Označení vychází z toho, že palivo se ve válci vznítí jeho kompresí. Rozdíl oproti zážehovému motoru je v tom, že přes sací ventily proudí do motoru pouze vzduch bez paliva. Jelikož má palivo (nafta) nižší odpařivost, vstřikuje se palivo přímo do válce při kompresním zdvihu. Během komprese vzduchu se jeho teplota zvedne na tolik (800 až 900 °C), že palivo vstřikované do stlačeného vzduchu se vznítí. Požadovaný výkon motoru je regulován množstvím vstřikovaného paliva do válců motoru. Účinnost vznětových motorů (asi 45 %) je o dost vyšší než u zážehových (asi 33 %) [10]. Vstřikovací systém vznětového motoru zabezpečuje dodávku paliva ve správný okamžik a také jeho rozptýlení na co možná nejjemnější kapičky. Množství paliva vstřikované do válce ovlivňuje doba otevření vstřikovací trysky.

#### 3.1 TVORBA SMĚSI

Výkon je u vznětových motorů řízen množstvím vstřikovaného paliva. Stechiometrický poměr ( $\lambda = 1$ ) naftových motorů je zhruba 14,5 kg vzduchu na 1 kg paliva. U vznětových motorů je však typický přebytek vzduchu, protože mez kouřivosti motoru odpovídá  $\lambda = 1,4$ . V provozu motor pracuje na mezi kouření při plném zatížení. Při tomto stochiometrickém poměru na 1 kg paliva připadá asi 19,3 kg vzduchu. Vznětové motory pracují s velmi chudou směsí, která se při chodu na prázdko pohybuje v rozmezí  $\lambda \in (3;4)$ . Směs je u vznětových motorů nehomogenní a tvoří se ve válci motoru [5].

U vznětových motorů rozlišujeme přímé a nepřímé vstřikování.

##### 3.1.1 NEPŘÍMÉ VSTŘIKOVÁNÍ

Motory s touto technologií jsou označovány jako motory komůrkové nebo motory s děleným spalovacím prostorem (obr. 10). Způsob tvorby směsi se nazývá termický. Palivo se vstřikuje do komůrky, kde se mísí se vzduchem a je vstřikováno do válce tak, aby se rozteklo po stěnách spalovacího prostoru. Díky teplu ze stěn spalovacího prostoru se palivový film odpařuje a páry se mísí se vzduchem. Tvoří se směs, která vlivem komprese postupně hoří [1].

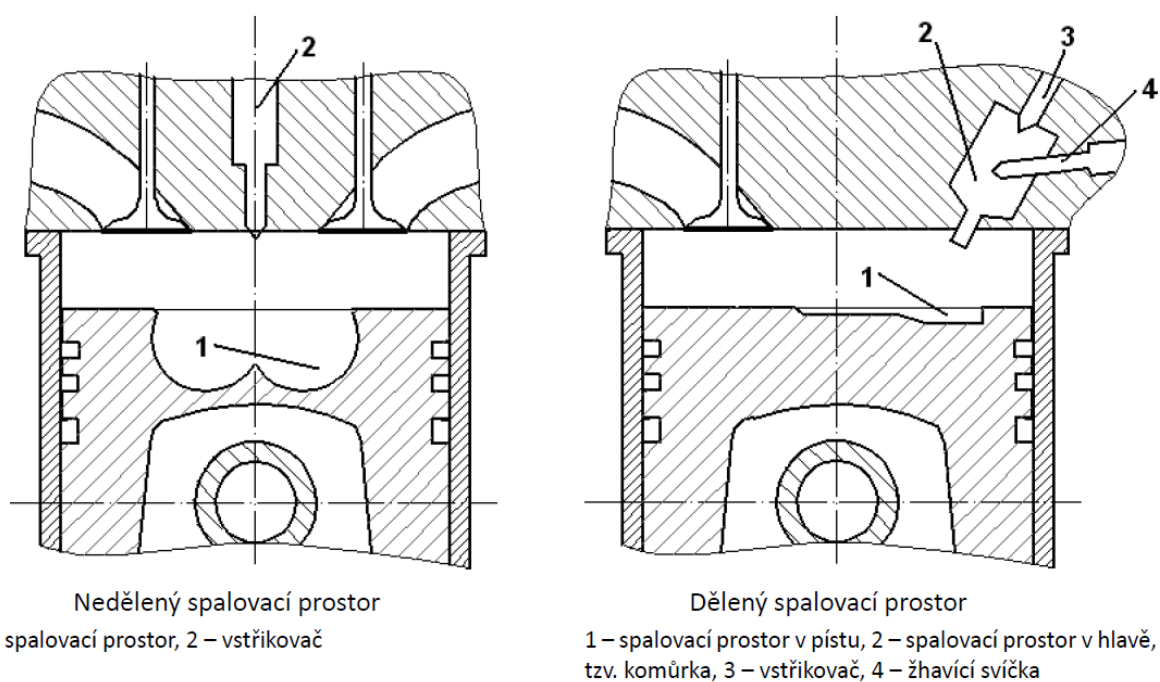
Pro start motoru je v komůrce umístěna žhavicí svíčka, která před startem nahřeje komůrku. Palivo se dobře promísí se vzduchem díky intenzivnímu víření vzduchu v komůrce i v druhé části děleného spalovacího prostoru na dně pístu. Proto se používají pro vstřik paliva jedno či dvou otvorové trysky s nižšími otevíracími tlaky. Díky tomu nejsou kladeny na vstřikovací soustavu vysoké nároky a nehrozí karbonizace a následné ucpání výtokového kanálku z komůrky. Dělený spalovací prostor je členitý a vznikají v něm relativně velké tepelné ztráty. Další hydraulické ztráty vznikají ve výtokovém kanálku. Kvůli těmto ztrátám mají komůrkové motory vyšší spotřebu paliva, což je jejich hlavní nevýhodou, a proto se dnes už používají výhradně motory s přímým vstřikem paliva. Oproti motorům s přímým vstřikem jsou však komůrkové kultivovanější díky pomalejšímu nárůstu tlaku nad pístem [1].

##### 3.1.2 PŘÍMÉ VSTŘIKOVÁNÍ

U přímého vstřikování se využívá tzv. objemový způsob tvorby směsi. Palivo ve vstřikuje a je jemně rozprášeno do neděleného spalovacího prostoru (obr. 10) a vyplňuje jeho celý objem. Palivo by nemělo dopadat na stěny spalovacího prostoru [1].

U přímého vstřikování jsou kladeny vysoké nároky na vstřikovací soustavu, protože kvalita směsi je závislá na co nejlepším rozprášení paliva. Proto je nutné použít vysoké vstřikovací tlaky. Nárůst tlaku nad pístem je rychlejší než u komůrkových motorů, proto jsou vibrace a hluchost vyšší. Vstřikovače mají více malých otvorů, které jsou náchylné k zakarbonování. Kvůli tomu jsou kladeny vyšší nároky na kvalitu paliva. Jelikož jsou motory s přímým vstřikem úspornější, na což je v dnešní době kladem důraz, používají se v automobilech výhradně místo motorů komůrkových [1].

Klasické vstřikovací systémy pracují s tlakem zhruba 50-90 MPa. Kvůli přísným emisním limitům se však používají vysokotlaké systémy, které dosahují vstřikovacích tlaků až 200 MPa. To se společně s přepínáním příznivě projevuje na emisních vlastnostech vznětových motorů.



Obr. 10 Schéma neděleného a děleného spalovacího prostoru [1]

### 3.2 Spalování

V následujících odstavcích této kapitoly byly informace čerpány z literatury [16].

U vznětových motorů se používají těžko odpařitelná paliva. Pro spalování (zažehnutí paliva) je potřeba, aby bylo jemně rozpráшено, odpařeno, smícháno se vzduchem a aby se jeho teplota zvýšila nad hodnotu samovznícení. Proces spalování se dělí na 3 části: průtah vznícení, spalování připravené (promíchané) směsi paliva se vzduchem a spalování heterogenní směsi.

Průtah vznícení nazýváme dobu mezi začátkem vstřikování paliva a jeho vznícením. Bezprostředně po začátku vstřikování se kolem vstřikovaného paprsku tvoří oblasti směsi odpařeného paliva a vzduchu. Jakmile teplota vzroste nad teplotu samovznícení, připravená směs ve válci se samovolně zapálí. Toto je fáze spalování již připravené směsi ve válci. Ke spalování dochází v oblastech kolem palivového paprsku, kde je směs plně smíchána se vzduchem. Další fázi nazýváme tzv. spalování heterogenní směsi. Palivo vstřikované do válce není zcela smícháno se vzduchem před jeho vznícením. Šíření plamene ovlivňuje rychlost

tvorby nové směsi, které je dána difuzními poměry paliva a vzduchu v místech mísení. Hoření směsi v této fázi se proto označuje jako difuzní hoření.

Palivo se u vznětového motoru začíná vstříkovat na konci kompresního zdvihu a vstřikování končí až za horní úvratí. Směs se tedy tvoří za jejího současného spalování. Díky turbulencím ve spalovacím prostoru je zajištěno účinné vyhořívání směsi v celém spalovacím prostoru.

Palivo vznětových motorů (nafta) je klasifikováno pomocí cetanového čísla. Požadavek pro palivo vznětového motoru je schopnost samovolného vznícení. Cetanové číslo paliva vyjadřuje jeho schopnost samovznícení (opak oktanového čísla). Čím vyšší je cetanové číslo, tím kratší je průtah vznícení. Pokud je cetanové číslo příliš nízké, palivo se vznítí velice pozdě. V té době už je velice dobře smícháno se vzduchem a po jeho vznícení může dojít ke klepání, protože palivo hoří příliš rychle. Motorová nafta má cetanové číslo v rozmezí 40-55.

### 3.3 VÝHODY A NEVÝHODY

Vznětové motory mají oproti zážehovým jisté výhody a nevýhody [15]:

#### VÝHODY

- vyšší účinnost, a proto nižší spotřeba paliva
- nižší emise  $\text{CO}_2$
- v současné době nižší cena paliva
- vyšší točivý moment, proto jsou vhodnější například pro tahání nákladu
- zpravidla delší životnost

#### NEVÝHODY

- vyšší hlučnost
- vyšší pořizovací cena
- nákladnější servis
- produkují větší množství oxidů dusíku
- nevhodné pro používání na krátké vzdálenosti

### 3.4 POROVNÁNÍ EMISÍ ZÁŽEHOVÉHO A VZNĚTOVÉHO MOTORU

Dokonalým spalováním uhlovodíkových paliv vzniká oxid uhličitý ( $\text{CO}_2$ ) a voda ( $\text{H}_2\text{O}$ ). Při spalování nedokonalém vzniká navíc oxid uhelnatý ( $\text{CO}$ ) a vodík ( $\text{H}_2$ ). U zážehových motorů se ve výfukových plynech objevuje kyslík ( $\text{O}_2$ ) pouze při větším přebytku vzduchu ve směsi. Protože motory vznětové pracují běžně s přebytkem vzduchu, kyslík je vždy součástí výfukových plynů. Největší podíl ve spalínách má dusík ( $\text{N}_2$ ). Za nepříznivých podmínek (vysokých teplotách) vznikají při spalování oxidy dusíku ( $\text{NO}_x$ ) a také uhlovodíky ( $\text{HC}$ ). U vznětových motorů se za nepřístupu vzduchu tvoří z kapiček paliva pevné částice uhlíku (saze) označované jako PM [1].

Mezi opatření ke snížení škodlivých emisí používaných u zážehových motorů patří ovlivnění směšovacího poměru, volba kompresního poměru, recirkulace výfukových plynů a použití katalyzátoru. Nově se do zážehových motorů začaly montovat také filtry pevných částic. Pro vznětové motory se používá k redukci škodlivých emisí zejména zvyšování vstřikovacích tlaků, recirkulace výfukových plynů pomocí EGR ventilu, dále také katalyzátory a filtry pevných částic [1].

Aby bylo možné nové automobily provozovat na silnicích v Evropské unii (EU), je nutné, aby vozidlo prošlo homologační emisní kontrolou. Množství emisí, které vozidlo vypouští, musí odpovídat aktuálně platné emisní normě EURO. V Evropě nabyla platnosti první emisní norma EURO I v roce 1992. Tato norma se neustále zpřísňuje. Stanovuje maximální množství emisních plynů, které může automobil vyprodukovat za 1 kilometr jízdy [14]. V tabulce (obr. 11) je porovnání množství vypouštěných emisí zážehových a vznětových motorů.

předpis	platnost	CO	HC	HC + NOx	NOx	PM
<b>Zážehové motory</b>		<b>g·km<sup>-1</sup></b>				
Euro 1	1992	2,72	–	0,97	–	0,14
Euro 2–IDI	1996	1	–	0,7	–	0,08
Euro 2–DI	1999	1	–	0,9	–	0,1
Euro 3	2000.01	0,64	–	0,56	0,5	0,05
Euro 4	2005.01	0,5	–	0,3	0,25	0,025
Euro 5	2009.09	0,5	–	0,23	0,18	0,005
Euro 6	2014.09	0,5	–	0,17	0,08	0,005
<b>Vznětové motory</b>		<b>g·km<sup>-1</sup></b>				
Euro 1	1992.07	2,72 (3,16)	–	0,97 (1,13)	–	–
Euro 2	1996.01	2,2	–	0,5	–	–
Euro 3	2000.01	1,2	0,2	–	0,15	–
Euro 4	2005.01	1	0,1	–	0,08	–
Euro 5	2009.09	1	0,1	–	0,06	0,005
Euro 6	2014.09	1	0,1	–	0,06	0,005

Obr. 11 Limity emisní normy EURO pro vozidla do 3,5 tuny [1]

## 4 MOTOR HCCI

Inženýři vyvíjející spalovací motory se neustále snaží optimalizovat tři důležité vlastnosti motoru – spotřebu paliva, emise a účinnost. Způsobů, které se používají k optimalizaci je několik. Patří mezi ně například přímé vstřikování, zvyšování vstřikovacích tlaků, variabilní časování ventilů, složení paliva a další. Cílem je vytvořit motor, který bude úspěšnější a ekologičtější [18].

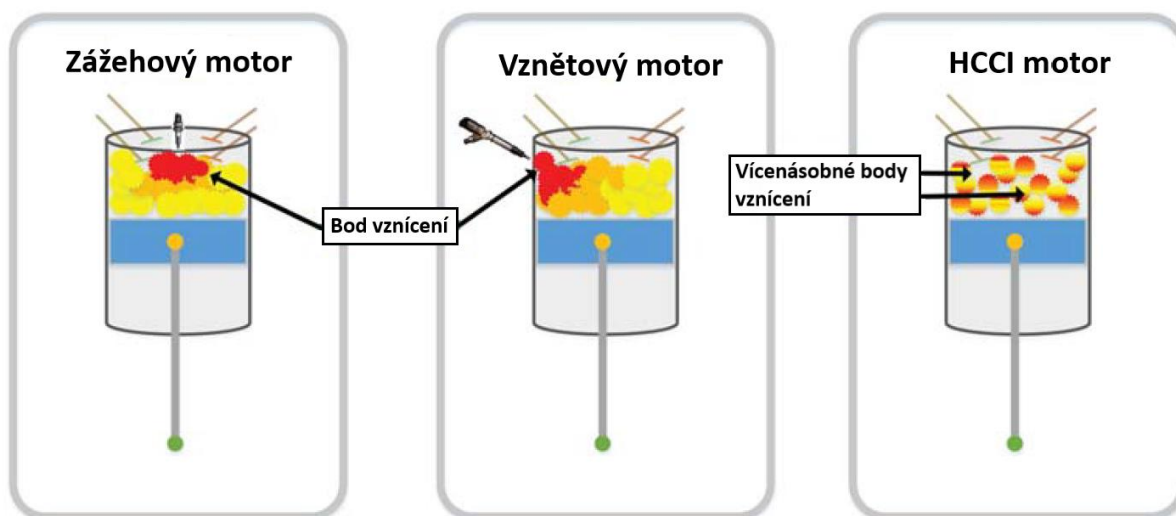
Se zpřísnováním emisních limitů jsou automobilky nuceny vyvíjet řešení produkující, pokud možno, nejmenší množství emisí. Konečným cílem by měla být vozidla s nulovými emisemi, odpovídajícím výkonem a cenou. Současné elektromobily však tento ideál nejsou schopny naplnit, zejména kvůli použití baterií, které jsou jednak relativně drahé, a aby měly dostatečnou kapacitu, tak také rozměrné a těžké a největší problém je s jejich ekologičností výroby a následné likvidace [18]. Jelikož zatím neexistují účinné baterie, probíhá další vývoj technologie spalovacího motoru. Během posledních 25 let byla intenzivně zkoumána technologie HCCI (Homogeneous Charge Compression Ignition) motorů. Jedná se o typ motoru s nízkou teplotou spalování (LTC – Low Temperature Combustion). HCCI motor můžeme definovat jako kombinaci motoru zážehového (SI) a motoru vznětového (CI) [18]. Zájem o tuto technologii vzrostl kvůli zpřísnování emisních limitů a zvyšování ceny paliva. Technologii HCCI má potenciál zlepšit účinnost spalovacího motoru a zároveň snížit množství vypouštěných emisí.

### 4.1 PRINCIP FUNGOVÁNÍ HCCI MOTORU

U motoru HCCI tvorba směsi probíhá podobně jako u zážehového motoru. Palivo se míchá se vzduchem v systému sání, nebo přímo ve válci u přímého vstřikování. Následně je směs paliva se vzduchem stlačena. Na konci komprese dochází k samovznícení směsi jako u vznětového motoru. Teplota směsi ve válci musí být na začátku komprese zvýšena tak, aby směs na konci komprese dosáhla teploty potřebné pro samovznícení směsi. Pokud nebude teplota dostatečná, směs se nemusí vznítit a může docházet k vynechávání motoru. Zvýšení teploty se dosahuje buď ponecháním části horkých spalin ve válci nebo ohříváním nasávaného vzduchu. Díky zvýšení teploty dojde k urychlení chemických reakcí vedoucích ke vznícení a začátku spalování směsi [19].

K samovznícení dochází v celém prostoru spalovacího prostoru současně. Samovznícení a spalování tedy probíhá současně a tím pádem je všechno teplo uvolněno najednou. Díky tomu je doba spalování ve srovnání se zážehovými a vznětovými motory kratší. Aby spalování v HCCI motoru probíhalo správně, je potřeba zařídit vhodné podmínky především v blízkosti horní úvrati pístu a během vysokého zatížení a vysokých otáček motoru, jinak může docházet ke klepání. Aby se zamezilo klepání při vysokém zatížení, je směs velmi chudá, případně se míchá s vysokým množstvím výfukových plynů [18].

Uvolňování tepla se u motorů HCCI (obr. 12) liší od motorů zážehových a vznětových. V zážehovém motoru je uvolňované teplo omezeno tzv. reakční zónou (vrstva mezi spálenou a nespálenou směsí). U motoru vznětového se uvolňování tepla dosahuje difúzním spalování směsi. V motoru HCCI se všechna směs účastní spalování najednou, takže celkové uvolněné teplo je součtem uvolněného tepla ze všech jednotlivých reakcí [18].



Obr. 12 Porovnání spalování motoru zážehového / vznětového / HCCI [18]

## 4.2 TVORBA SMĚSI

Správná příprava směsi paliva se vzduchem je důležitá pro výslednou kvalitu směsi a také ovlivňuje začátek spalování a složení emisí vznikajících při spalování. Míchání paliva se vzduchem ovlivňují také vlastnosti paliva. Každé palivo má určitou viskozitu, hustotu, výparné teplo a tyto vlastnosti společně s tlakem par ovlivňují proces tvorby směsi a distribuci tepla ve válci HCCI motoru. Příprava homogenní směsi musí být zajištěna v jednotlivých cyklech motoru, a to i při různých zatíženích motoru. Hlavním cílem přípravy směsi je zajistit, aby byla směs paliva a vzduchu homogenní a měla stejnou teplotu, a to v celém spalovacím prostoru dříve, než dojde k vícenásobnému samovznícení [20].

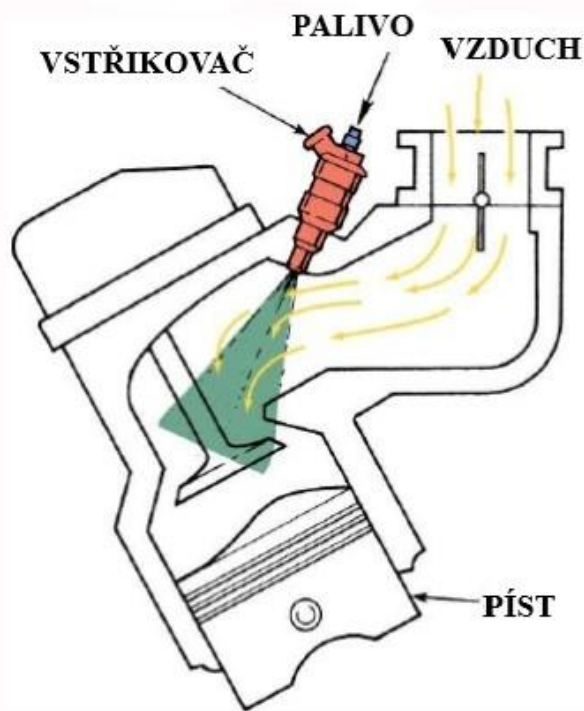
Strategie tvorby směsi se dělí na vnější a vnitřní. Obě metody mají svoje výhody a nevýhody. Vnější tvorba směsi zajišťuje vytvoření homogenní směsi, ale má nízkou objemovou účinnost (poměr čerstvé náplně a teoreticky možného množství – zdvihového objemu). Při vnitřní tvorbě směsi lze lépe řídit okamžik vznícení, ale je náchylná k ředění oleje ve válci [20].

### 4.2.1 VNĚJŠÍ TVORBA SMĚSI

Nejjednodušší a nejefektivnější metodou pro vnější tvorbu směsi je nepřímé vstřikování (obr. 13). Vstřikovač je nainstalován v sacím potrubí nebo v sacím otvoru a velmi blízko sacích ventilů. Vstřikování do sacího systému se používá zejména pro paliva s nízkou reaktivitou (benzín, paliva na bázi alkoholu). Palivo je vstříknuto do systému sání, kde se míchá se vzduchem během sacího zdvihu. Homogenizace směsi je podpořena turbulencí vzduchu vytvořenou při jeho nasávání [20].

Při použití této technologie a paliva ethanolu může spalování HCCI probíhat s velmi chudou směsí a doba vznícení může být řízena časováním ventilů, otáčkami motoru a koeficientem  $\lambda$ . Hlavním problémem je nemožnost řídit začátek vznícení. K rozšíření provozního rozsahu HCCI motoru se nepřímé vstřikování kombinuje se vstřikováním přímým. Při této kombinaci se nepřímým vstřikováním vstřikuje palivo s nízkou reaktivitou (benzín) a přímým vstřikováním se vstřikuje palivo s vysokou reaktivitou (nafta) přímo do válce motoru. Přímý vstřik je použit především k ovládnutí času vznícení. Tato kombinace pomáhá rozšířit pracovní rozsah motoru a dosáhnout vysoké účinnosti a nízkých emisí [20].

Při použití těžkých paliv s nízkou odpařivostí v kombinaci s nepřímým vstřikováním nebude palivo dobře odpařeno a bude smáčet stěny spalovacího prostoru, na kterých se vytvoří film. Proto se pro paliva s nízkou odpařivostí a vysokým bodem varu (nafta, bionafta) používá tzv. odpařovač paliva, díky kterému se palivo odpaří a dosáhne lepší homogenity. Odpařené palivo se míchá se vzduchem v systému sání a homogenní směs je nasávána do válce během sacího zdvihu. Produkce  $\text{NO}_x$  a sazí je značně nižší než u klasického vznětového motoru. Pro správné časování vznícení je použit systém EGR s chlazením výfukových plynů [20].



Obr. 13 Schéma nepřímého vstřikování [21]

Vnější tvorba směsi je nejjednodušší a nejúčinnější způsob přípravy směsi pro HCCI motory díky dostatku času k vytvoření homogenní směsi. Problémem je ovšem nízká objemová účinnost a ovládání času vznícení. Kvůli tomu se s vnější tvorbou směsi používá vždy ještě další technologie, díky které bude možné časovat samovznícení. Jedná se například o přímé vstřikování, vícenásobné vstřikování nebo systém EGR [20].

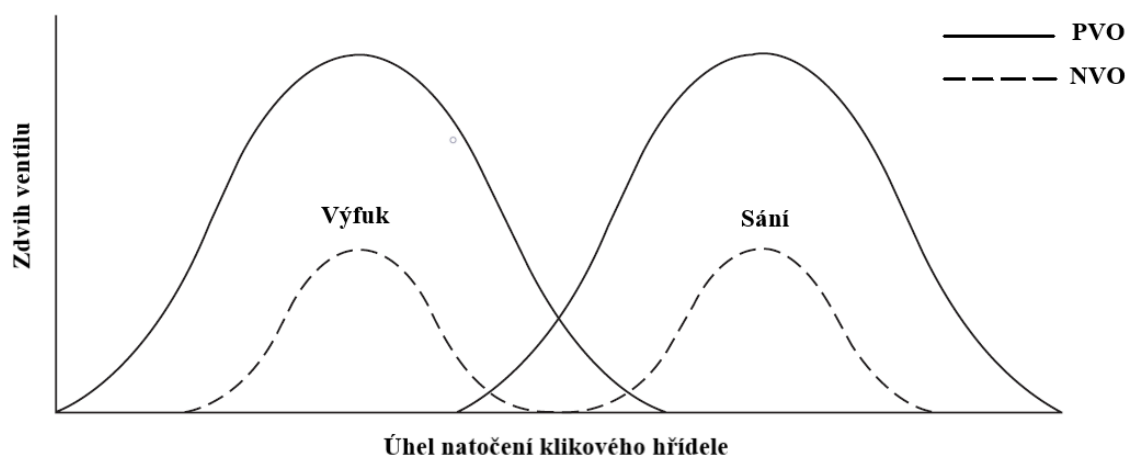
#### 4.2.2 VNITŘNÍ TVORBA SMĚSI

Pro přípravu směsi přímo ve válci se využívá přímého vstřikování. Pomocí přímého vstřikování lze dosáhnout vysoké objemové účinnosti a také ovládat časování vznícení díky možnosti řídit časování vstřiku paliva. Palivo se vzduchem a zbytkovými plyny vytvoří ve válci relativně homogenní směs předtím, než dojde k samovznícení [20]. Přímé vstřikování můžeme dělit na jednovstřikové (dávka paliva je vstříknuta najednou), dvouvstřikové a několika-vstřikové [20].

Vstřikování paliva v jedné dávce vyžaduje přesnou kontrolu vstřikovacího tlaku a doby vstřiku, aby bylo palivo správně rozprášeno a odpařeno. Při vysokých vstřikovacích tlacích dochází ke smáčení stěn spalovacího prostoru, což způsobuje ředění oleje palivem, neúplné spalování a vysoké emise HC. Aby bylo dosaženo homogenní směsi a správné doby vznícení, je nutné ohřívání nasávaného vzduchu, zvýšení tlaku, intenzity turbulencí nebo vysoký podíl EGR



plynů. Při spalování v HCCI motoru spalujícím benzín může být použit vyšší plnicí tlak, díky kterému je vyšší maximální spalovací tlak a uvolňování tepla je rychlejší. Díky proměnnému časování ventilů může být palivo vstříknuto ve fázi tzv. NVO (negative valve overlap – negativní překrytí ventilů – při sacím zdvihu jsou zavřené sací i výfukové ventily, píst se pohybuje dolů a ve válci se tvoří vakuum). Endotermická reakce během NVO (obr. 14) způsobí pokles teploty ve spalovacím prostoru, teplota samovznícení směsi však není významně ovlivněna [20].



Obr. 14 Porovnání pozitivního (PVO) a negativního (NVO) překrytí ventilů [19]

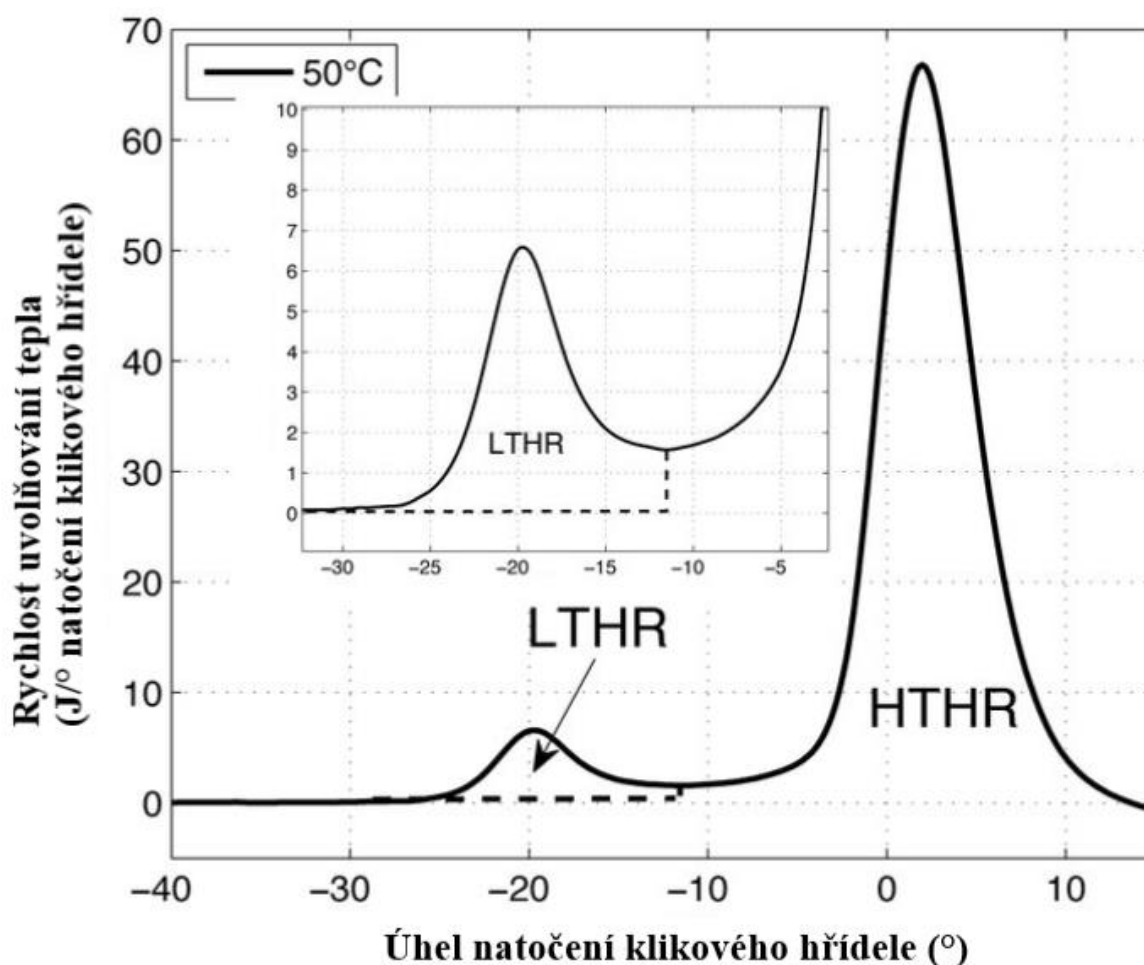
Rozdělení vstřikovaného paliva do dvou nebo více dávek omezuje smáčení stěn spalovacího prostoru palivem a umožňuje lepší kontrolu tvorby směsi a její distribuci ve válci. Navíc umožňuje řídit LTHR a HTHR (low/high temperature heat release (obr. 15)). HCCI spalování má dvě fáze – nízko teplotní a vysoko teplotní uvolňování tepla, spalování začíná s LTHR a následuje HTHR), což umožňuje optimalizovat fáze spalování a zmírnit rychlost nárůstu tlaku během spalování [20].

Použití děleného vstřikování při použití nafty jako paliva HCCI motoru má za následek snížení emisí HC, pevných částic a vysokou tepelnou účinnost. U motoru spalujícího benzín tato strategie vede k prodloužení procesu spalování a tím snížení nárůstu tlaku během zvýšeného zatížení motoru [20].

U vnitřní tvorby směsi v HCCI motoru je vhodné kombinovat paliva s vysokou a nízkou reaktivitou. Výhodou je vysoká objemová účinnost a řízení doby samovznícení, naopak nevýhodou je delší zpoždění vznícení a nižší teplota pro tvorbu homogenní směsi paliva se vzduchem. Kvůli nižší teplotě je nutná vysoká intenzita turbulence vzduchu, aby byla vytvořena homogenní směs [20].

Jako ideální pro tvorbu směsi pro HCCI motor se jeví kombinace vnější a vnitřní tvorby směsi, protože každá metoda má svoje výhody a nevýhody a jejich kombinace představuje ideální kompromis [20].





Obr. 15 Graf závislosti rychlosti uvolňování tepla na úhlu natočení klikového hřídele [22]

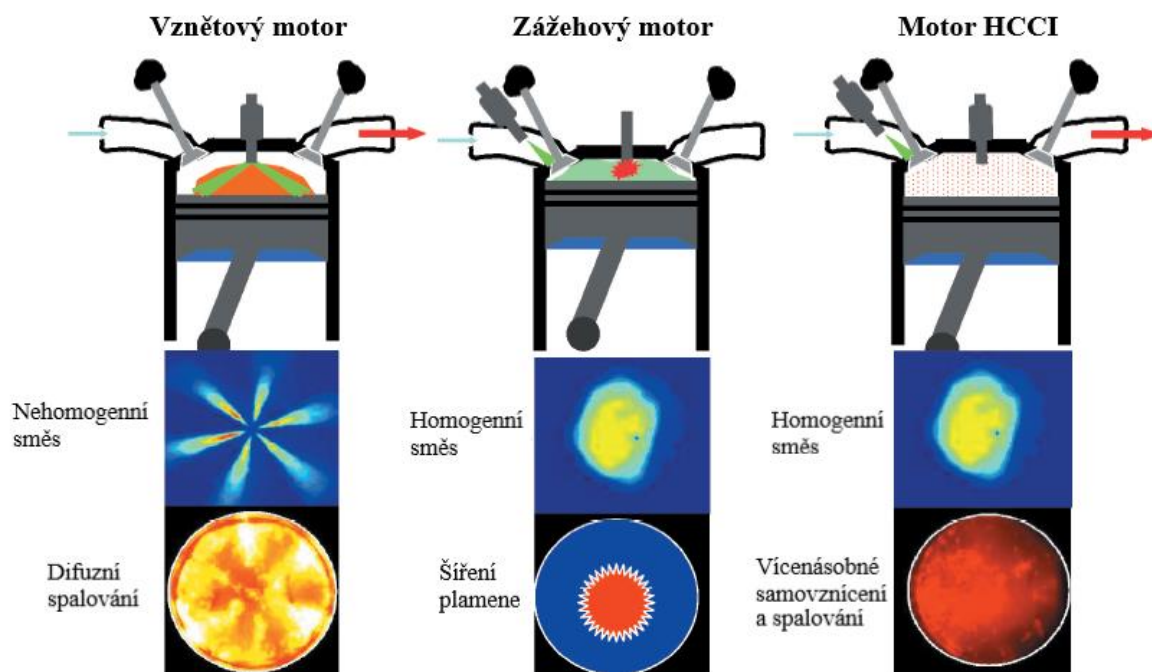
### 4.3 SPALOVÁNÍ

Spalování HCCI stojí na konceptu samovznícení chudé směsi paliva se vzduchem. Na rozdíl od zážehových motorů, kde dochází při spalování k šíření plamene a od vznětových motorů, kde probíhá difuzní spalování, je u motoru HCCI spalování (obr. 16) řízeno chemickou kinetikou [23]. Spalování chudé směsi v HCCI motoru probíhá při nízkých teplotách (v porovnání se zážehovými a vznětovými motory). Nízkoteplotní spalování začíná kolem teploty 1500 K (minimální teplota pro přeměnu CO na CO<sub>2</sub> při spalování). Nejvyšší teplota spalování je limitována náchylností motoru ke klepání. To je způsobeno velkými tlakovými spády ve válci z důvodu příliš rychlého spalování [23].

Doba spalování u motorů HCCI se pohybuje v řádu několika milisekund, a to v době, kdy se píst nachází v blízkosti horní úvrati. Jelikož je doba spalování velice krátká, dá se o spalování v HCCI motoru hovořit jako o prostorově rovnoměrné explozi (tlaková vlna se šíří rovnoměrně). Tlak vyvolaný explozí nesmí být větší než pro limitní hodnoty, pro které je motor navržen, jinak může dojít k jeho poškození [23].

Při poměru přebytečného vzduchu 3 a menším se většina tepla uvolní do času jedné milisekundy (za předpokladu, že směs je homogenní). Při tomto čase spalování dochází k tomu, že ne všechna směs se vznítí ve stejný okamžik vlivem velkých tlakových spádů ve spalovací komoře,

a ne zcela rovnoměrnému rozdělení paliva ve spalovací komoře. Nárůst tlaku dosahuje hodnot 10 barů za desetinu milisekundy. Při tomto nárůstu tlaku dochází k oscilaci vzduchu ve spalovací komoře. Jev je to velmi podobný jako detonační spalování (klepání) u zážehového motoru. Zatížení vyvolané klepáním musí u motoru HCCI být v určitých mezích, pro které je motor navržen, jinak dojde po určitém čase k poškození pístu, stěn spalovacího prostoru nebo klikového ústrojí [23].



Obr. 16 Spalování a směs HCCI motoru a motorů zážehových a vznětových [19]

Rychlost spalování je potřeba správně řídit. Uvolňování tepla ve fázi LTHR lze ovlivnit použitím aditiv do paliva, případně kombinací dvou paliv. Řízení uvolňování tepla ve fázi vysokoteplotní (HTHR) je problematické a je plně závislé na kinetice chemických reakcí [23].

#### 4.3.1 PARAMETRY PRO ŘÍZENÍ SPALOVÁNÍ

Dobu samovznícení a následný průběh hoření lze u HCCI motorů řídit několika parametry:

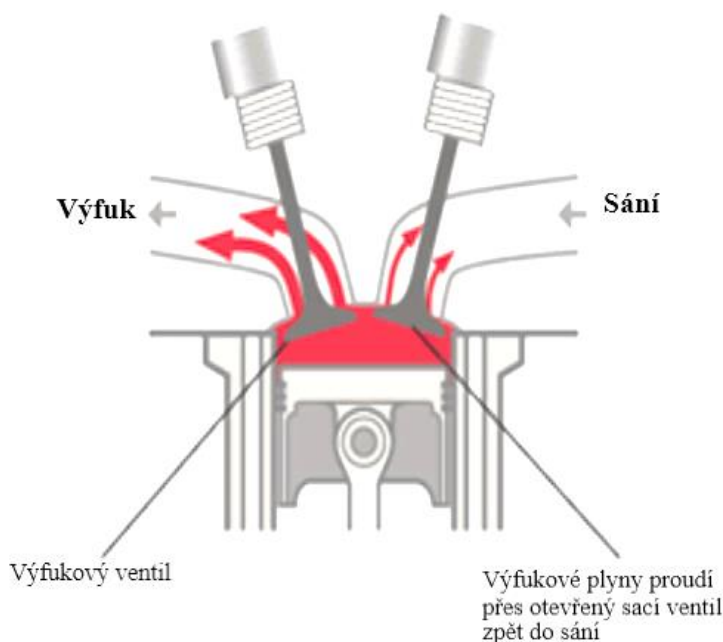
##### RECIRKULACE SPALIN (EGR)

Systém EGR funguje na principu, že část výfukových plynů vrací zpět do spalovacího prostoru. Systém funguje za pomoci tzv. EGR ventilu, který spojuje sací a výfukové potrubí. Jakmile se ventil otevře, začnou pronikat výfukové plyny do sacího potrubí, kde se míchají s čerstvým nově nasávaným vzduchem. Výsledek tohoto procesu je, že výsledná směs má menší podíl kyslíku. To má obecně nepříznivý vliv na výkon, ale pozitivní vliv na množství vypouštěných emisí, protože EGR snižuje teplotu spalování.

Systém se používá ke snížení množství oxidů dusíku produkovaného motorem. Výfukové plyny, které se vrací do systému sání, snižují poměr měrného tepla a tím teplotu spalování. U vznětových motorů je podíl EGR limitován zhruba na 30 %, protože množství kyslíku se snižuje

až na hranici, kdy začne klesat účinnost spalování. U motorů HCCI je možné využívat vyšší množství EGR, protože na rozdíl od motorů vznětových spalování neprobíhá difuzním plamenem, který není schopen při větších podílech EGR dokonale spálit palivo [23].

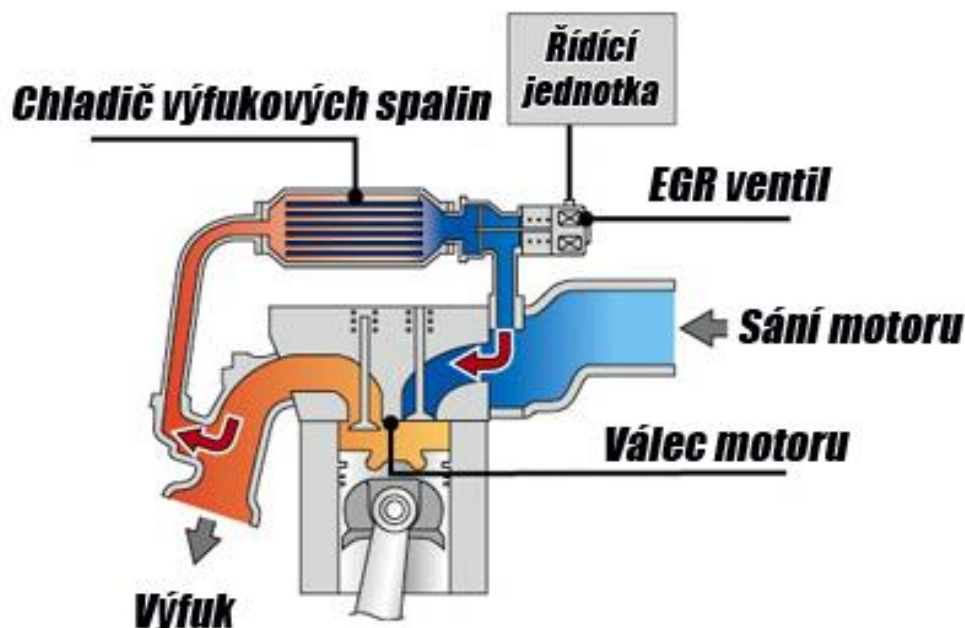
U motorů HCCI se však systém EGR nepoužívá primárně ke snížení emisí  $\text{NO}_x$ . Hlavním důvodem použití je, že díky němu lze ovlivnit dobu samovznícení. První variantou je vnitřní recirkulace spalin (obr. 17), která funguje díky proměnnému časování rozvodu. Systém funguje na principu, že ve fázi výfuku dojde k dřívějšímu otevření sacích ventilů a výfukové plyny, které jsou nahoru se pohybujícím pístem tlačeny ven z motoru, se dostanou otevřenými sacími ventily zpět do systému sání [24]. Tyto výfukové plyny jsou horké, a to u HCCI vede ke zkrácení doby, za kterou dojde k samovznícení [23].



Obr. 17 Interní recirkulace výfukových plynů (Interní EGR) [25]

Druhou variantou je tzv. externí systém EGR (obr. 18). Výfukové plyny jsou vráceny zpět do sání přes ventil EGR, který je aktivně řízen. Součástí systému je také chladič výfukových plynů [24]. Při použití vnějšího EGR jsou plyny vrácené do systému sání chladné, což má u motoru HCCI za následek zkrácení doby, za kterou dojde k samovznícení [23].

Zbytkové výfukové plyny, které zůstanou ve válci po výfuku, jsou označovány také jako interní EGR. Mají podpůrný vliv na rychlost samovznícení díky jejich vysoké teplotě. Tyto zbytkové plyny byly použity v jednom z prvních konceptů HCCI motoru, označeném ATAC. Jednalo se o dvoutaktní motor spalující benzín, který byl nasazen v motocyklech [23].



Obr. 18 Externí recirkulace výfukových plynů s chlazením (Externí EGR) [26]

### TEPLOTA NASÁVANÉHO VZDUCHU

Doba samovznícení u HCCI motoru závisí také na teplotě nasávaného vzduchu, protože pro samovznícení musí dojít k určitým chemickým reakcím, které jsou závislé na výsledné teplotě směsi. Okamžik, ve kterém dojde k samovznícení lze tedy ovlivnit a řídit pomocí teploty nasávaného vzduchu. K řízení se využívá ohřívání nasávaného vzduchu, dále také míchání teplého a studeného vzduchu, pomocí něhož lze dodávat potřebnou teplotu vzduchu pro jednotlivé cykly motoru [23].

### KOMPRESNÍ POMĚR

Kompresní poměr je nejdůležitějším faktorem pro časování samovznícení u HCCI motorů. Potřebný kompresní poměr se liší pro různá paliva, protože každé palivo má různé chemické vlastnosti a schopnost samovznícení. Paliva s vysokým cetanovým číslem (vysokou reaktivitou), jako jsou např. motorová nafta a DME (dimethylether), potřebují k samovznícení nižší teploty. Takovým palivům proto stačí nižší kompresní poměry. Paliva s vysokým oktanovým číslem (např. benzín, methanol) potřebují k samovznícení vyšší teplotu, proto se u HCCI motoru, který využívá tato paliva, používá vysoký kompresní poměr [23].

### SOUČINITEL $\phi$

Součinitel  $\phi$  je převrácená hodnota součinitele přebytku vzduchu  $\lambda$ . Z toho plyne, že čím je hodnota  $\phi$  nižší, tím je směs chudší a naopak. Při hodnotě 1 je stechiometrická.

$$\phi = \frac{1}{\lambda} \quad (2)$$

Pomocí hodnoty součinitele  $\phi$  lze také řídit dobu samovznícení. Při zvýšení hodnoty součinitele  $\phi$  (směs bude bohatší) dojde ke zkrácení doby samovznícení, protože ve směsi je vyšší

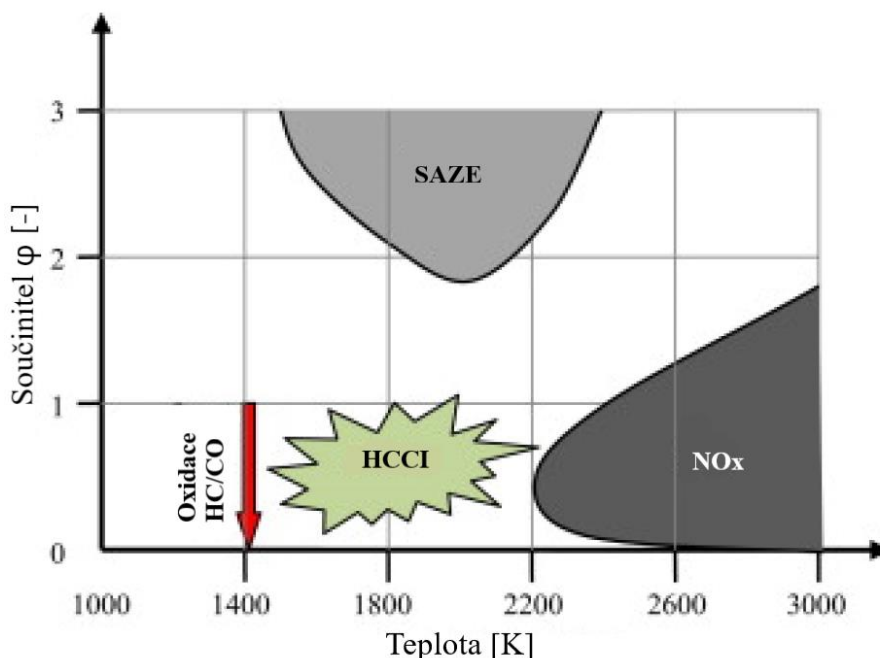
koncentrace paliva a díky tomu dojde ke zvýšení teploty spalování. Chemické reakce vedoucí k samovznícení probíhají za vyšší teploty rychleji. Zvýšení teploty spalování má za následek zvýšení teploty stěn spalovacího prostoru a také pístu. Díky tomu probíhá samovznícení ještě dříve. Správná hodnota součinitele  $\phi$  je důležitá, aby bylo možné udržet dobu samovznícení na optimální hodnotě v průběhu cyklu motoru [23].

#### 4.4 EMISE

Spalovací motory se rozdělují na zážehové a vznětové. Zážehové pracují s nižším kompresním poměrem, a proto mají nižší účinnost. Vznětové motory mají sice účinnost vyšší, ale produkují škodlivé látky znečišťující ovzduší, jako  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_x$  a  $\text{HC}$ . Dále také pevné částice, které vznikají nedokonalým spalováním, případně přítomností prachu v nasávaném vzduchu. Pevné částice se dělí na dva druhy:  $\text{PM}_{10}$  (jsou částice o velikosti  $10\text{ }\mu\text{m}$  a menší) a  $\text{PM}_{2,5}$  ( $2,5\text{ }\mu\text{m}$  a menší) [27]. Pevné částice v ovzduší přispívají ke špatné viditelnosti a ovlivňují přenos tepelného záření. Emise produkované spalovacími motory způsobují různá onemocnění a globální oteplování, proto se vývojáři snaží vyvíjet lepší techniky spalování, se kterými by motory měly vyšší účinnost, nižší emise a spotřebu paliva.

Technologie HCCI může být vhodným řešením. Homogenní směs se vznítí, jakmile směs dosáhne dostatečné chemické aktivační energie, a spalování začíná ve více místech spalovacího prostoru zároveň. Zároveň je spalování podstatně rychlejší ve srovnání s motory zážehovými a vznětovými. Motory s režimem spalování HCCI používají chudou směs s přebytkem vzduchu a dochází k samovznícení směsi a spalení bez viditelného planeme [27].

V grafu (obr. 19) lze vidět oblasti tvorby emisí  $\text{NO}_x$  a sazí v závislosti součinitele  $\phi$  na teplotě.



Obr. 19 Graf oblastí tvorby emisí v závislosti součinitele  $\phi$  na teplotě [27]

Tvorba emisí  $\text{NO}_x$  (zahrnuje  $\text{NO}$  a  $\text{NO}_2$ ) je značně závislá na teplotě. Většina emisí  $\text{NO}_x$  je produkována při vysokých teplotách spalování v kombinaci s nízkým součinitelem  $\phi$ , proto je pro snížení množství  $\text{NO}_x$  potřeba, aby teplota plamene při spalování nepřesáhla 2200 K. K tvorbě sazí dochází při středních teplotách spalování a vysokém koeficientu  $\phi$  (bohatá směs). U vznětových motorů lze dosáhnout např. snížení emisí  $\text{NO}_x$ , ale zároveň dojde ke zvýšení produkce sazí, nebo naopak. U motorů HCCI se využívá kontroly teploty spalování a koeficientu  $\phi$  ke snížení emisí  $\text{NO}_x$  a sazí zároveň. Jelikož motor pracuje s homogenní směsí, dojde při kompresním zdvihu k samovznícení v celém spalovacím prostoru současně. Díky tomu se netvoří postupně šířící plamen s vysokou teplotou a výsledná teplota spalování je nižší, což přispívá ke snížení emisí  $\text{NO}_x$ . Směs je u HCCI motoru chudá, což vede zároveň ke snížení tvorby sazí [27].

## **$\text{NO}_x$**

Minimální aktivační teplota pro rozpad vazby molekuly dusíku  $\text{N}_2$  je zhruba 1800 K. Pokud dojde k rozpadu vazby, na dusík se začne vázat kyslík a vznikají škodlivé emise  $\text{NO}$  a  $\text{NO}_2$ . Výsledná nejvyšší teplota spalování u HCCI motoru je většinou kolem 1800-2000 K díky spalování chudé směsi. To má za následek, že k rozpadu trojné vazby  $\text{N}_2$  nedochází, případně velice zřídka, a proto se tvoří velice málo emisí  $\text{NO}_x$ . U motorů zážehových a vznětových se teplota spalování blíží 2500 K, proto je množství emisí  $\text{NO}_x$  násobně vyšší než u motorů HCCI [27].

## **PEVNÉ ČÁSTICE**

K tvorbě sazí u spalovacích motorů dochází kvůli oblastem s bohatou směsí, ve kterých dochází k nedokonalému spalování, protože není přítomno dost kyslíku pro úplný rozklad uhlovodíků v době spalování. Jelikož motor HCCI pracuje s velmi dobře promíchanou homogenní chudou směsí, netvoří se místa s bohatou směsí, a tím je odstraněna příčina tvorby sazí při spalování [27].

## **CO**

Oxid uhelnatý ( $\text{CO}$ ) se vytváří z důvodů příliš nízké teploty při spalování. Aby byl  $\text{CO}$  kompletně přeměněn na  $\text{CO}_2$ , je potřeba teploty vyšší než 1500 K. U motoru HCCI je při určitých podmínkách teplota ve spalovacím prostoru nižší, což má za následek zvýšené emise  $\text{CO}$ . Konvenční zážehový motor dosahuje nižších emisí  $\text{CO}$  než motor HCCI. Splnění limitů emisí  $\text{CO}$  je jednou z hlavních výzev pro vývojáře. Snížení emisí  $\text{CO}$  je možné dosáhnout snížením podílu EGR, ale tato strategie má za následek zvýšení emisí  $\text{NO}_x$  [27].

## **HC**

Emise uhlovodíků ( $\text{HC}$ ) jsou u HCCI spalování vyšší z důvodu nižších teplot při spalování.  $\text{HC}$  se tvoří v místech, kde je teplota příliš nízká pro úplné spálení, např. stěny spalovacího prostoru [27].

## **VÝHODY HCCI**

Jelikož v režimu HCCI motor pracuje s chudou směsí a kompresními poměry vyššími než 15:1, je možné dosáhnout vyšší účinnosti než u zážehových motorů. Je možné používat různá paliva a produkce emisí  $\text{NO}_x$  a pevných částic je nižší [27].

## NEVÝHODY HCCI

Kvůli nižší teplotě spalování produkují motory HCCI více emisí HC a CO. Tento problém lze však řešit například použitím katalyzátorů, jelikož výfukové plyny obsahují dostatečné množství kyslíku [27].

## 4.5 KONCEPTY A SOUČASNÁ ŘEŠENÍ

Spalování HCCI bylo zkoumáno už od minulého století a vzniklo několik konceptů motorů, na kterých bylo dosaženo spalování HCCI a získané poznatky byly použity při dalším vývoji.

### 4.5.1 BENZÍNOVÉ HCCI MOTORY

#### ATAC

Zkratka ATAC vznikla z anglického Active Thermo-Atmosphere Combustion. Jednalo se o dvoutaktní motor spalující benzín. První koncept byl představen v roce 1979 a během let došlo k jeho vývoji s nástupem nových technologií, jako je například přímé vstřikování. První funkční prototyp motoru ATAC s přímým vstřikováním byl představen v roce 1996. Díky kombinaci přímého vstřiku paliva a spalování HCCI motor bez problémů splňoval emisní limity platné v roce 2000 a dosahoval o 20% nižší spotřeby paliva než čtyřtaktní motor s konvekčním spalováním a stejným výkonem [19].

Ve dvoutaktním motoru může být dosaženo kontrolovaného samovznícení směsi (CAI) díky velkému množství zbytkových výfukových plynů ve válci. Pro dosažení stabilního HCCI spalování je potřeba vysoká průměrná teplota směsi. Při nízkých zatíženích průměrná teplota směsi klesne a dochází k vynechávání motoru, protože teplota směsi není dostatečná k samovznícení. Při vysokém zatížení motor potřebuje více čerstvé směsi a tím pádem dochází ke snížení podílů zbytkových výfukových plynů, což vede opět ke snížení teploty nedostatečné k samovznícení. Spalování ATAC je kombinováno se zapalováním svíčkou. Při nejnižších zatíženích je teplota výfukových plynů příliš nízká pro spalování ATAC a směs příliš chudá pro zapalování svíčkou. Když se zvedne zatížení a s ním teplota výfukových plynů, motor pracuje v ATAC módu. S dále vzrůstajícím zatížením motor může pracovat v módu ATAC a zapalování svíčkou zaměnitelně. Při nejvyšších zatížení motor pracuje jako klasický zážehový a směs je zapálena svíčkou [19].

Motory s technologií ATAC se mimo jiné zabývala společnost Honda, když se roce 1995 zúčastnila Rallye Dakar s jejími dvoutaktními ATAC motocykly. Motor měl jeden válec o objemu 400 cm<sup>3</sup>. Motocykly si vedly nad očekávání dobře a výsledkem bylo 5. místo v závodě. Honda na úspěch navázala vývojem motoru ATAC pro použití ve skútrech. Výsledkem byl skútr Honda Pantheon AR 125 (obr. 20), který se dokonce prodával na přelomu tisíciletí v Evropě. Jeho prodej byl zastaven v roce 2003 kvůli přísnějším emisním limitům, které motor díky přípravě směsi karburátorem nesplňoval [19].





*Obr. 20 Skútr Honda Pantheon 125 [28]*

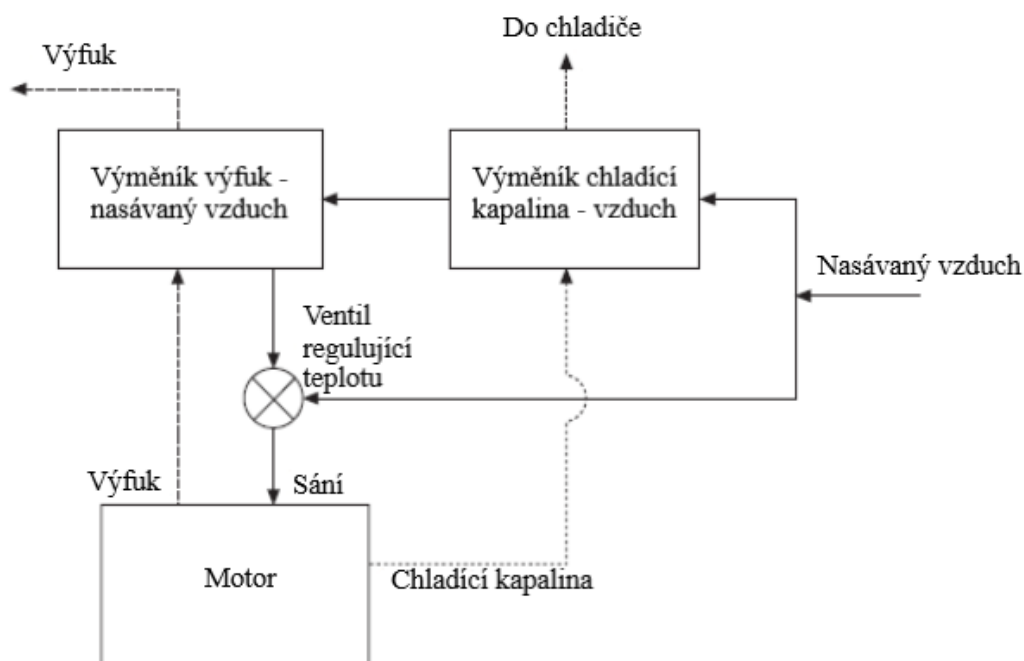
## OKP

U čtyřtákních motorů je obtížnější dosáhnout teploty samovznícení směsi, protože čtyřtákní motor generuje méně tepla při spalování než motor dvoutákní. Navíc podíl zbytkových výfukových plynů je u dvoutákních motorů vyšší kvůli méně efektivní výměně plynů ve spalovacím prostoru, což plyne ze samotné konstrukce dvoutákních motorů. Výfukové plyny se u dvoutákních motorů rychle mísí s čerstvou směsí a vytvořená směs je ihned stlačena. U čtyřtákních motorů je klíčem k HCCI spalování správné množství tepelné energie potřebné k samovznícení. Koncept motoru OKP (Optimised Kinetic Process) je založen na využití odpadní tepelné energie výfukových plynů a tepla z chladicí kapaliny, která se používá k ohřevu nasávaného vzduchu. Motor OKP je čtyřdobý a jako palivo používá benzín. Kompresní poměr tohoto motoru je vysoký, obvykle kolem 15:1 [19]. Řízení doby samovznícení v OKP motoru je založeno na regulaci teploty nasávaného vzduchu. K tomu jsou použity dva výměníky tepla zapojené podle schématu (obr. 21), které ohřívají nasávaný vzduch.

Nasávaný vzduch se rozděluje na dva proudy. Jeden vede přes výměník chladicí kapalina – vzduch do výměníku výfukové plyny – vzduch. Druhý nevede přes výměníky tepla, tudíž je studený. Oba proudy poté vedou do ventilu, který ovládá teplotu výsledného vzduchu proudícího do motoru mícháním proudů teplého a studeného vzduchu. Tím se řídí doba samovznícení. Motor OKP kombinuje spalování HCCI s klasickým zapalováním svíčkou. Zapalování svíčkou se používá při studených startech a vysokém zatížení, přičemž kompresní poměr musí být redukován na 10:1, aby nedocházelo k detonačnímu spalování. K tomu se využívá variabilního časování ventilů [19].

Motor OKP je komplikovanější a dražší než konvenční zážehový motor kvůli přítomnosti dodatečného hardwaru, jako jsou tepelné výměníky a podobně. Díky výměníkům tepla (ohřívání nasávaného vzduchu) má OKP motor vyšší potenciál fungovat v režimu HCCI i při nižších zatíženích [19]. Aby se jeho nasazení vyplatilo, musí to být vyváženo výrazně vyšší účinností. Jinak disponuje tento motor výhodami HCCI motoru, jako je snížená spotřeba paliva a snížené množství vypouštěných emisí.





Obr. 21 Schéma OKP motoru [19]

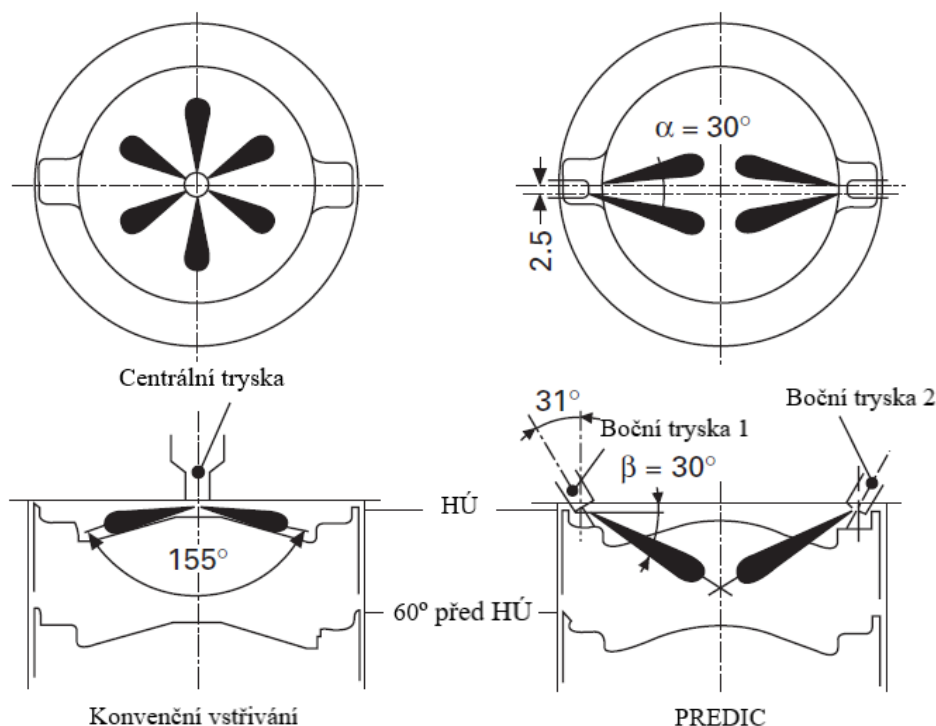
#### 4.5.2 NAFTOVÉ HCCI MOTORY

##### PREDIC

Koncept motoru PREDIC (PREmixed lean Diesel Combustion) využívá jako palivo naftu, která je vstřikována přímo, a to v rané fázi kompresního zdvihu, když je píst ještě daleko od horní úvrati. To zajistí spalování plně promíchané směsi. Oproti nepřímému vstřikování je hlavní výhodou vyšší teplota a hustota plynu, což zrychluje vypařování paliva a tím pádem je čas potřebný pro vytvoření homogenní směsi je kratší. Díky tomu není potřeba ohřívát nasávaný vzduch. Teplota spalování během kompresního zdvihu je nižší a není problém s příliš brzkým samovznícením. Problémem však stále zůstává řízení přesného okamžiku samovznícení, protože neexistuje přímé spojení mezi dobou vstřiku a dobou samovznícení [19].

PREDIC pracuje s naftou, jejíž cetanové číslo je nižší (20-40) než u nafty pro konvenční vznětové motory, aby bylo zabráněno klepání. Umístění trysek vstřikování je u PREDIC motoru jiné než u konvenčních vznětových motorů s přímým vstřikováním. Je to proto, že palivo je vstřikováno asi 90° před HÚ a při použití centrální trysky by velké množství paliva během kompresního zdvihu ulpívalo na stěnách válce. Proto jsou trysky u PREDIC motoru (obr. 22) umístěny po stranách spalovacího prostoru a vstřikují palivo směrem do jeho středu [19].

Problémem konceptu PREDIC je nízký točivý moment (asi poloviční oproti motoru vznětovému) při atmosférickém plnění, protože součinitel přebytku vzduchu  $\lambda$  je nutno udržovat vyšší než 2,5. Ke zvýšení točivého momentu bylo nutno použít přeplňování, což ovšem vede k příliš rychlému samovznícení. Aby k tomu nedocházelo, musí být u přeplňovaného výrazně zvýšen součinitel  $\lambda$ . Hlavním přínosem PREDIC je snížení emisí  $\text{NO}_x$  oproti vznětovému motoru až na 1/10. Snížení spotřeby paliva ovšem není výrazné, protože neexistuje přímá kontrola doby samovznícení. Nevýhodou jsou vyšší emise HC a CO [19].



Obr. 22 Uložení vstřikovacích trysek u konvenčního a PREDIC spalování [19]

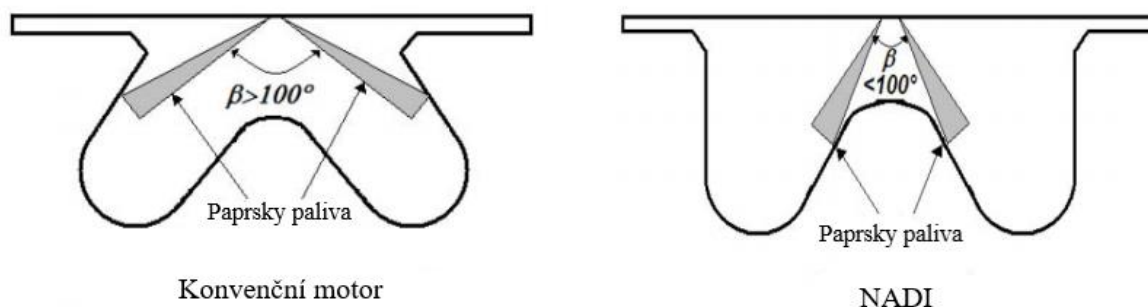
## MULDIC

Systém spalování MULDIC (MULTiple stage Diesel Combustion) je vylepšení systému PREDIC za účelem zvýšení točivého momentu motoru. Vstřikování paliva probíhá ve dvou úrovních. Nejprve je vstříknuto palivo stejně jako u systému PREDIC a druhá dávka paliva je vstříknuta až potom, co píst dosáhne HÚ. Tento způsob vstřikování dále snižuje emise  $\text{NO}_x$  oproti systému PREDIC a navíc výrazněji snižuje spotřebu paliva. Emise HC jsou však stále vyšší než u konvenčního vznětového motoru [19].

## NADI

Koncept NADI (Narrow Angle Direct Injection) spojuje dva módy spalování. V nízkých a středních zatíženích motor pracuje v HCCI režimu a při zatížení vysokém přechází do spalování klasického vznětového motoru. Systém využívá přímého vstřikování, hlava válce je plochá a píst má specifickou prohlubeň. Vstřikování paliva probíhá v úzkém kuželu (asi  $70^\circ$ ), aby bylo zabráněno ulpívání paliva na stěnách spalovacího prostoru a usnadněno míchání paliva se vzduchem. Kompresní poměr motoru je asi 16:1. Vstřikování paliva v několika dávkách zajišťuje vstřikovací systém common-rail [19].

Bylo nutné vyvinout vhodný tvar prohlubně v pístu (obr. 23) kvůli použití vstřikování paliva v úzkém kuželu (obr. 23), aby bylo zajištěno správné smíchání paliva se vzduchem. Motor je přeplňovaný a používá systém EGR. Koncept NADI motoru dosahuje velmi nízkých emisí  $\text{NO}_x$  a pevných částic, zároveň s lepší spotřebou paliva. Emise HC a CO jsou na podobné úrovni jako u motoru vznětového. Navíc oproti vznětovému motoru stejné konfigurace dosahuje koncept NADI vyššího výkonu a točivého momentu [19].



Obr. 23 Porovnání konvenční a NADI prohlubně pístu a způsobu vstřikování paliva [29]

## MK

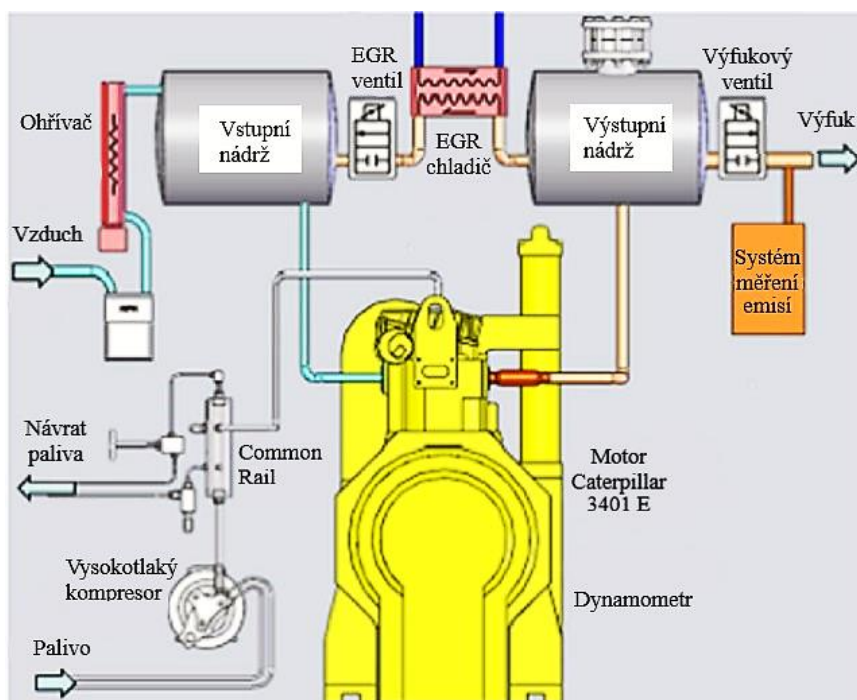
Koncept MK (Modulated Kinetics) je založen na nízkoteplotním spalování a předem promíchané směsi, která ovšem nemusí být homogenní. Zaměřuje se primárně na snížení emisí  $\text{NO}_x$  a pevných částic, což je největší problém vznětových motorů s přímým vstřikováním [19].

Tvorba emisí  $\text{NO}_x$  silně závisí na teplotě, jejím snížením dosáhneme nižších emisí. Nízká teplota spalování je doplněna velkým podílem EGR za účelem snížení koncentrace kyslíku a také sníženým kompresním poměrem. S klesajícím podílem kyslíku však rostou emise pevných částic. U konceptu MK je tento problém řešen dokonalým promícháním směsi paliva se vzduchem, a to pomocí prodloužené prodlevy vznícení. K dosažení prodloužené prodlevy vznícení je použit nižší kompresní poměr a doba vstřiku je posunuta až do pozdní fáze kompresního zdvihu. Tyto úpravy však vedou ke snížení účinnosti a vyšším emisím HC. Proto se využívá regulace vstřikování paliva k jeho správné distribuci ve spalovacím prostoru. Toho je možné dosáhnout pomocí kombinace toroidního tvaru spalovacího prostoru a vysokého poměru víření. Díky těmto úpravám koncept MK dosahuje také nízkých emisí HC a pevných částic [19].

### 4.5.3 MOTOR CATERPILLAR 3401 E

Koncept motoru Caterpillar 3401 E (obr. 24) byl zatím jediný, ve kterém bylo dosaženo pravého HCCI spalování. Jedná se o jednoválcový motor spalující naftu o obsahu  $2440 \text{ cm}^3$  určený do pracovních strojů. Motor byl vybaven přímým vysokotlakým vstřikovacím systémem common rail. Palivo bylo vstřikováno v jedné dávce, a to až po dosažení HÚ. Součinitel přebytku vzduchu  $\lambda$  byl nastaven na 1,2 a podíl EGR na 60 % [30]. Na motoru byl zkoumán vliv cetanového čísla na parametrech spalování, spotřebě paliva a emisích.

Studie ukázala, že při použití paliva s nižším cetanovým číslem (30) vykazoval motor nižší spotřebu díky kratší době spalování a lepší možnosti optimalizace doby samovznícení. Doba mezi vstřikem paliva a jeho samovznícením byla delší, díky tomu měla směs více času na dokonalé promíchání a motor dosahoval prakticky nulových emisí pevných částic. Paliva s vyšším cetanovým číslem (55) naopak způsobovala vyšší emise pevných částic a  $\text{NO}_x$ . Emise CO a HC byly při použití vyššího cetanového čísla mírně nižší [30].



Obr. 24 Schéma motoru Caterpillar 3401 E [30]

#### 4.5.4 MOTOR SKYACTIV-X

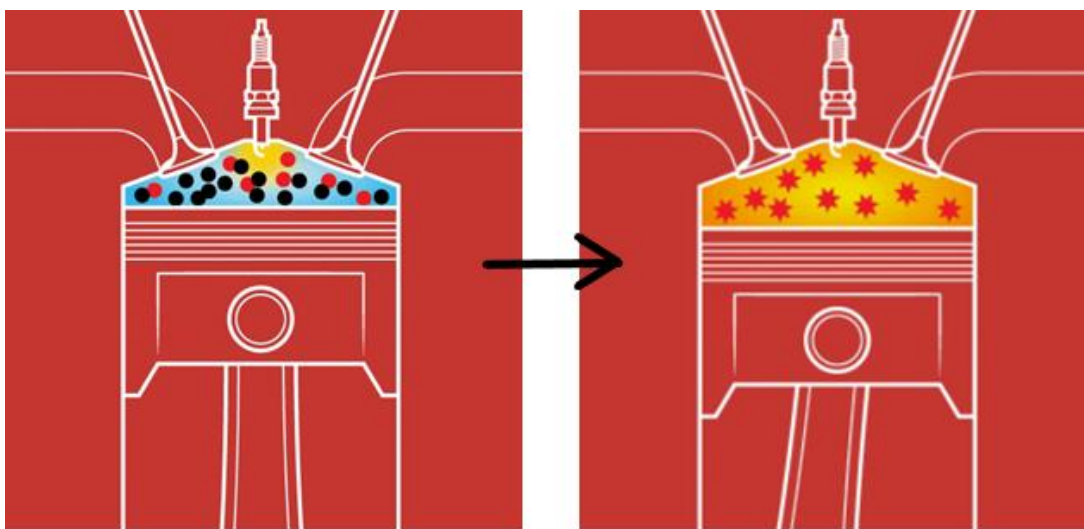
V roce 2019 představila společnost Mazda svůj nový motor Skyactiv-X (obr. 25). Jedná se o pohonnou jednotku o obsahu  $1998 \text{ cm}^3$  (2.0) spalující benzín. Výkon motoru je 132 kW a točivý moment 224 N·m [31]. Oproti většině konkurence má motor vyšší zdvihový objem a není přepřínován turbodmychadlem, což je netypické na dnešní dobu, kdy se požadovaných emisních limitů dosahuje převážně kombinací snižování zdvihového objemu a přepřínování.



Obr. 25 Motor Mazda 2.0 Skyactiv-X [32]

Motor Skyactiv-X je unikátní v tom, že se jedná o první motor využívající HCCI spalování nasazený do produkčního automobilu na světě. Označení X vychází dle slov Mazdy ze zkrácení motoru zážehového a vznětového. Společnost Mazda tento motor vyvinula, protože věří v budoucnost spalovacích motorů a dalo by se říct, že jde proti proudu dnešní doby [32].

V předchozích kapitolách bylo nastíněno, že řízení doby samovznícení je jedním z hlavních problémů HCCI motorů. Mazda tento problém vyřešila svojí patentovanou technologií SPCCI (Spark Controlled Compression Ignition). Technologie SPCCI je založena na tom, že k řízení doby samovznícení používá zapalovací svíčku. Směs je u SPCCI motoru velmi chudá a kompresní poměr vysoký (16,3:1) [32]. Část paliva je vstřikována během sacího zdvihu a jelikož je směs příliš chudá, nedojde během kompresního zdvihu k samovznícení. Další část paliva je vstříknuta během kompresního zdvihu (výsledná směs se nestihne ohřát nad teplotu samovznícení). Kdyby byla celá dávka paliva vstříknuta najednou, mohlo by během kompresního zdvihu dojít k samovznícení, což je nežádoucí. K dobré homogenizaci směsi pomáhá přepážka v sacím otvoru, která vytváří intenzivní víření ve spalovací komoře. Aby byla směs dostatečně chudá, využívá se při vyšších zatíženích motoru pomocný kompresor. Jeho funkce je u Skyactiv-X motoru opačná než u běžných přeplňovaných motorů. Zatímco běžně se používá, aby v motoru bylo více vzduchu a mohlo být použito více paliva, u motoru Skyactiv-X kompresor zajišťuje, aby byla směs dostatečně chudá. Na konci kompresního zdvihu se vstřikuje druhá malá dávka paliva, a to do oblasti zapalovací svíčky. Tato směs je bohatší, aby mohla být zapálena svíčkou. Jiskra ze svíčky zapálí toto malé množství paliva (obr. 26) a plamen šířící se spalovacím prostorem zvýší tlak natolik, že se homogenní chudá směs ve spalovacím prostoru sama vznítí [32]. O správný čas samovznícení se starají senzory tlaku v každém z válců a získaná data vyhodnocují elektronické systémy, které řídí přesný čas vstřiku paliva a přesný čas zažehnutí jiskrou.



Obr. 26 Zapálení malého množství paliva v oblasti zapalovací svíčky a následné samovznícení v celém spalovacím prostoru [32]

Dalším problémem HCCI motorů je jejich využitelnost pouze v úzkém spektru zatížení motoru. Díky použití svíček k řízení HCCI spalování má motor Skyactiv-X mnohem širší oblast, kdy motor pracuje jako HCCI. Dalším řešením, které umožňuje kompresní zapalování směsi v širším spektru zatížení je výše zmíněný kompresor, díky kterému je i při vyšších otáčkách směs dostatečně chudá. Motor Skyactiv-X využívá také systému EGR s chlazením, který



pomáhá udržovat teplotu spalování na optimálních hodnotách [33]. Výsledkem je že, že motor Skyactiv-X pracuje v režimu SPCCI v širokém spektru zatížení motoru, pouze v nejvyšších otáčkách motor přechází na zapalování směsi svíčkou a funguje jako konvenční zážehový motor.

Výrazný přebytek vzduchu má za následek vyšší účinnost motoru a snížení spotřeby paliva. Kromě toho však Skyactiv-X nabízí vyšší výkon a točivý moment než klasický zážehový motor od stejného výrobce o stejném zdvihovém objemu označený Skyactiv-G [31]. Srovnání základních parametrů těchto motorů je uvedeno v tabulce níže (obr. 27).

	Skyactiv-X180	Skyactiv-G150
Zdvihový objem válců (cm <sup>3</sup> ):	1998	1998
Nejvyšší výkon (kW/k)	132/180	110/150
Nejvyšší točivý moment (Nm)	224	213
Kompresní poměr	16,3 : 1	13 : 1
Kombinovaná spotřeba (l/100 km)	4,6	5,3
Emise CO <sub>2</sub> (g/km)	105	121

Obr. 27 Srovnání parametrů motorů Mazda Skyactiv-X a Skyactiv-G [31]

Jak bývá zvykem u většiny výrobců, udávaná spotřeba motoru ne vždy úplně odpovídá skutečnosti v běžném provozu. Z testování automobilových magazínů vyplývá, že s motorem Skyactiv-X lze jezdit za udávanou spotřebu 4,6 l/100 km, ale pouze při opravdu klidné jízdě. Reálný průměr se při testování většinou pohyboval kolem 6 l/100 km, což je ve srovnání například s klasickým zážehovým motorem od Mazdy Skyactiv-G stále velmi dobrá spotřeba. Navíc má v průměru o 10% vyšší točivý moment než motor Skyactiv-G [31]. Jízdní projev motoru Skyactiv-X je velmi podobný atmosférickým zážehovým motorům. Má lineární nárůst výkonu napříč celým spektrem otáček a maximum točivého momentu je k dispozici od 2600 do 5400 min<sup>-1</sup> [31].

Motor Skyactiv-X je rovněž vybaven tzv. mild hybridním ústrojím. Jedná se o generátor poháněný řemenem z klikové hřídele. Systém pracuje s napětím 24 V a energii získanou při zpomalování ukládá do baterie [32]. Následně je využita při vypnutí motoru po zastavení vozidla a jeho opětovném nastartování (systém start-stop).

## E-SKYACTIV-X

V roce 2021 automobilka Mazda přišla s vylepšeným motorem e-Skyactiv-X. Upraven byl kompresní poměr na 15:1 a bylo optimalizováno řízení spalování. Dále byl také vylepšen software mild hybridního systému. Těmito úpravami byl zvýšen výkon a točivý moment na 137 kW a 240 N·m [34]. Motor má nyní ještě nižší hodnotu udávané spotřeby, která má podle výrobce hodnotu 4,3 l/100 km a emise CO<sub>2</sub> rovněž klesly na hodnotu 96 g/km [35].

V současné době automobilka Mazda na českém trhu nabízí motor e-Skyactiv-X ve dvou modelech. Prvním z modelů je hatchback Mazda3 (obr. 28) a druhým je crossover Mazda CX-30 (obr. 29) [36]. Ukazuje se, že motor e-Skyactiv-X je u motoristů oblíbený, protože si ho volí do svých aut kolem 40 % evropských zákazníků.



*Obr. 28 Mazda3 [36]*



*Obr. 29 Mazda CX-30 [36]*

## ZÁVĚR

Se stále zpřísnujícími se emisními limity prošly spalovací motory výrazným vývojem. Výrobci se snaží, aby měl motor co nejlepší účinnost a spotřebu paliva, a přitom splňoval emisní normy. V evropské unii jsou platné emisní normy EURO a každý dopravní prostředek, prodáváný v evropské unii, musí tyto normy splnit. Jelikož je dopravní průmysl jedním z významných znečišťovatelů ovzduší a spalovací motory jsou součástí většiny osobních a nákladních automobilů, je nutné se snažit postupně snižovat množství jimi vypouštěných emisí. Čistota ovzduší je zásadní pro budoucnost lidstva, proto je snaha redukovat množství vypouštěných emisí na minimum. Jedním ze způsobů, jak výrazně snížit množství škodlivých látek ve výfukových plynech, je právě technologie kompresního zapalování homogenní směsi (HCCI).

V této práci byl vysvětlen princip fungování zážehových a vznětových motorů se zdůrazněním jejich výhod a nevýhod. Hlavní kapitola byla věnována HCCI motorům, byla vysvětlena tvorba směsi, její zapálení, množství vypouštěných emisí a byly uvedeny koncepty a současná řešení. Zájem o motory HCCI roste, protože emisní limity se neustále zpřísnují a také roste cena paliv. Motory HCCI mají potenciál zlepšit účinnost spalovacích motorů a snížit spotřebu paliva. Navíc lze využívat alternativních paliv. Další výhodou jsou nízké emise oxidů dusíku  $\text{NO}_x$  a pevných částic. Kromě těchto výhod mají však i řadu negativ a problémů, které je třeba vyřešit. Jedním z největších je určitě omezený rozsah zatížení motoru, ve kterém je schopen motor HCCI správně fungovat. Dalším problémem je nemožnost přímé kontroly okamžiku samovznícení. Kvůli nižší teplotě spalování mohou být emise HC a CO vyšší.

Společnost Mazda s jejím motorem Skyactiv-X ukázala, že tato technologie může fungovat v běžném provozu. Problémy HCCI motorů vyřešila kombinací kompresního zapalování spolu se zapalováním svíčkou konvenčních zážehových motorů (SPCCI). Testy ukázaly, že motor má svoje nesporné výhody a Mazda tak ukázala možnou cestu ostatním výrobcům. Podle mého názoru je budoucnost spalovacích motorů právě v technologii HCCI a konkrétně právě v hybridech kombinujících HCCI a zážehový mód nebo HCCI a konvenční vznětový mód.

Konečným řešením v dopravě by měla být vozidla s nulovými emisemi. Takovými vozidly by mohly být elektromobily, ale podle mého názoru mají ještě před sebou dlouhou cestu vývoje, než dokážou nahradit vozidla se spalovacími motory. V současné době jsou elektromobily stále výrazně dražší než automobily se spalovacím motorem a nejsou tak dostupné široké veřejnosti. Přesto jsou však stále oblíbenější a jejich prodejní čísla výrazně rostou (zejména v západních zemích). Myslím si, že přechod na plnou elektrifikaci bude přece jenom ještě několik let trvat, protože infrastruktura není zatím připravena na velké množství elektromobilů. Navíc je třeba vyřešit ekologické hledisko výroby a následné likvidace baterií. Alternativou mohou být taky hybridní pohony (kombinace spalovacího motoru s elektromotorem), které jsou v současné době velmi oblíbené a v nabídce je má většina výrobců automobilů. Vyvíjí se také další řešení, jako například automobily na vodík. Jaký druh pohonu se nakonec prosadí a bude dominantně nasazován do automobilů a dalších dopravních prostředků však ukáže až čas. Prozatím jsou však spalovací motory součástí každodenního života, a ještě několik let to tak nejspíš zůstane.



## POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] HROMÁDKO, Jan. Spalovací motory: komplexní přehled problematiky pro všechny typy technických automobilních škol. Praha: Grada, 2011. ISBN 978-80-247-3475-0.
- [2] TRONNER, Pavel. Nicolaus August Otto: A co kdyby ten motor běžel na čtyři takty? In: VTM.cz [online]. Praha: CZECH NEWS CENTER, 2017 [cit. 2021-02-18]. Dostupné z: <https://vtm.zive.cz/clanky/nicolaus-august-otto-a-co-kdyby-ten-motor-bezel-na-ctyri-takty/sc-870-a-188520/default.aspx>
- [3] SHUKLA, Aditya. The Story Of The First Automobile. In: Autocurious Car & Bike Technologies [online]. 2019 [cit. 2021-02-18]. Dostupné z: <https://autocurious.com/the-story-of-the-first-automobile/>
- [4] PECHOUT, Martin. Spalovací motory – základní přehled [online]. Praha: Česká zemědělská univerzita v Praze (ČZU), 2019 [cit. 2021-02-21]. ISBN 978-80-213-2984-3. Dostupné z: [https://katedry.czu.cz/storage/7579\\_Skripta-Pechout-draft-8.pdf](https://katedry.czu.cz/storage/7579_Skripta-Pechout-draft-8.pdf)
- [5] VLK, František. Vozidlové spalovací motory. Brno: František Vlk, 2003. ISBN 80-238-8756-4.
- [6] Dvoudobý spalovací motor. Wikipedia: the free encyclopedia. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2021. Dostupné také z: [https://cs.wikipedia.org/wiki/Dvoudob%C3%BD\\_spalovac%C3%AD\\_motor](https://cs.wikipedia.org/wiki/Dvoudob%C3%BD_spalovac%C3%AD_motor)
- [7] PEKÁREK, Stanislav. Technologie oprav 1 [online]. Nový Jičín: Střední škola technická a zemědělská, 2016 [cit. 2021-02-23]. ISBN 978-80-88058-23-6. Dostupné z: <https://publi.cz/books/160/Cover.html>
- [8] Four Stroke Cycle Engines. UW Courses Web Server [online]. Seattle [cit. 2021-02-26]. Dostupné z: [https://courses.washington.edu/engr100/Section\\_Wei/engine/UofWindsorManual/Four%20Stroke%20Cycle%20Engines.htm](https://courses.washington.edu/engr100/Section_Wei/engine/UofWindsorManual/Four%20Stroke%20Cycle%20Engines.htm)
- [9] KRÁLOVÁ, Magda. ČTYŘDOBÝ ZÁŽEHOVÝ MOTOR. In: Techmania Science Center: Eduportál [online]. [cit. 2021-02-26]. Dostupné z: <https://edu.techmania.cz/cs/encyklopedie/fyzika/plyny/tepelne-motory/ctyrdoby-zazehovy-motor>
- [10] JILEK, Petr a Jan POKORNÝ. Introduction to internal combustion engines: study material. Ed. 1st. Pardubice: University of Pardubice, Jan Perner Transport Faculty, 2014. ISBN 978-80-7395-800-8.
- [11] FERENC, Bohumil. Spalovací motory: karburátory, vstřikování paliva a optimalizace parametrů motoru. Vyd. 3. Brno: Computer Press, 2009. Auto-moto-profi (Computer Press). ISBN 978-80-251-2545-8.
- [12] Emission curves. In: Teach Engineering [online]. Colorado: Regents of the University of Colorado, 2013 [cit. 2021-03-03]. Dostupné z: [https://www.teachengineering.org/activities/view/cub\\_airquality\\_lesson01\\_activity2](https://www.teachengineering.org/activities/view/cub_airquality_lesson01_activity2)

- [13] GSCHIEDLE, Rolf. Příručka pro automechanika. Praha: Sobotáles, 2001. ISBN 80-859-2076-X.
- [14] ÇELİK, Mustafa Bahattin a Bülent ÖZDALYAN. Gasoline direct injection. In: Semantic Scholar [online]. Karabük: Karabük University, 2010 [cit. 2021-03-14]. Dostupné z: <https://www.semanticscholar.org/paper/X-Gasoline-direct-injection-%C3%87elik-%C3%96zdalyan/9a9a9842a121fbc03996cfa38e95bd23260f1822>
- [15] Diesel vs petrol: the pros and cons. Rias [online]. 2018 [cit. 2021-03-19]. Dostupné z: <https://www.rias.co.uk/news-and-guides/living-and-lifestyle/diesel-vs-petrol-the-pros-and-cons/>
- [16] KIRKPATRICK, Allan T. a Colin R. FERGUSON. Internal combustion engines: Applied Thermosciences. Third. United Kingdom: John Wiley, 2016. ISBN ISBN 978-1-118-53331-4.
- [17] SAJDL, Jan. Emisní norma EURO. Autolexicon.net [online]. 2016 [cit. 2021-03-06]. Dostupné z: <https://www.autolexicon.net/cs/articles/emisni-norma-euro/>
- [18] KOTHARI, Deepak. EXPERIMENTAL SETUP AND CONTROLLER DESIGN FOR AN HCCI ENGINE [online]. 2014 [cit. 2021-03-28]. Dostupné z: <https://digitalcommons.mtu.edu/etds/963/>. Master's Thesis. Michigan Technological University.
- [19] ZHAO, Hua, ed. HCCI and CAI engines for the automotive industry. 1. New York: CRC Press, 2007. ISBN 978-1-4200-4459-1.
- [20] DUAN, Xiongbo, Ming-Chia LAI, Marcis JANSONS, Genmiao GUO a Jingping LIU. A review of controlling strategies of the ignition timing and combustion phase in homogeneous charge compression ignition (HCCI) engine. Fuel [online]. 2021, 285 [cit. 2021-5-1]. ISSN 00162361. Dostupné z: doi:10.1016/j.fuel.2020.119142
- [21] BALAJI, Veeraraghavan. Simulation of a PFI Engine In Converge: Part-2. Skill-Lync [online]. 2020 [cit. 2021-5-1]. Dostupné z: <https://skill-lync.com/projects/week-10-project-1-full-hydro-case-set-up-pfi>
- [22] TRUEDSSON, Ida, William CANNELLA, Bengt JOHANSSON a Martin TUNER. Engine Speed Effect on Auto-Ignition Temperature and Low Temperature Reactions in HCCI Combustion for Primary Reference Fuels [online]. 2014 [cit. 2021-5-1]. Dostupné z: doi:10.4271/2014-01-2666
- [23] PEDERSEN, Troels Dyhr. Homogeneous Charge Compression Ignition Combustion of Dimethyl Ether [online]. 2011 [cit. 2021-5-1]. Dostupné z: <https://backend.orbit.dtu.dk/ws/portalfiles/portal/6321543/Thesis%2C+Troels+Dyhr+Pedersen.pdf>. Technical University of Denmark.
- [24] DUSIL, Tomáš. EGR ventil: Postrach moderních motorů. K čemu vlastně slouží? A proč je tak problémový? Auto.cz [online]. 2020 [cit. 2021-5-1]. Dostupné z: <https://www.auto.cz/egr-ventil-postrach-modernich-motoru-k-cemu-vlastne-slouzi-a-proc-je-tak-problemovy-103380>

- [25] Dual Injector. Nissan-Global [online]. [cit. 2021-5-1]. Dostupné z: [https://www.nissan-global.com/EN/TECHNOLOGY/OVERVIEW/dual\\_injector.html](https://www.nissan-global.com/EN/TECHNOLOGY/OVERVIEW/dual_injector.html)
- [26] EGR ventil – jeho funkce a působení na motor. Blogauto.cz: návody, recenze a zajímavosti ze světa aut [online]. 31.8.2016 [cit. 2021-5-1]. Dostupné z: <https://blogauto.cz/egr-ventil/>
- [27] MOFIJUR, M., M.M. HASAN, T.M.I. MAHLIA, S.M. Ashrafur RAHMAN, A.S. SILITONGA a Hwai Chyuan ONG. Performance and Emission Parameters of Homogeneous Charge Compression Ignition (HCCI) Engine: A Review. *Energies* [online]. 2019, 12(18) [cit. 2021-5-2]. ISSN 1996-1073. Dostupné z: doi:10.3390/en12183557
- [28] Honda Pantheon 125 (1998 - 02). MOTO.IT [online]. [cit. 2021-5-5]. Dostupné z: <https://www.moto.it/listino/honda/pantheon-125/pantheon-125-1998-02/neHIun>
- [29] DULBECCO, Alessio. Modeling of Diesel HCCI combustion and its impact on pollutant emissions applied to global engine system simulation [online]. Toulouse, 2010 [cit. 2021-5-7]. Dostupné z: <https://oatao.univ-toulouse.fr/7184/>. PhD Thesis. Institut National Polytechnique de Toulouse
- [30] DUMITRESCU, Cosmin E., W. Stuart NEILL, Hongsheng GUO, Vahid HOSSEINI a Wallace L. CHIPPIOR. Fuel Property Effects on PCCI Combustion in a Heavy-Duty Diesel Engine. ASME 2010 Internal Combustion Engine Division Fall Technical Conference [online]. ASMEDC, 2010, 2010-01-01, , 255-264 [cit. 2021-5-12]. ISBN 978-0-7918-4944-6. Dostupné z: doi:10.1115/ICEF2010-35194
- [31] DITTRICH, Lukáš. Motor Mazda Skyactiv-X v provozu a na brzdě: Co dokáže diesel na benzin? Autobible.euro.cz [online]. 10. 04. 2020 [cit. 2021-5-12]. Dostupné z: <https://autobible.euro.cz/motor-mazda-skyactiv-x-v-praxi-co-dokaze-diesel-na-benzin/>
- [32] CARNEY, Dan. Mazda's New Skyactiv-X Engine Gives New Life to Internal Combustion. *IEEE Spectrum* [online]. 30 Jul 2018 [cit. 2021-5-12]. Dostupné z: <https://spectrum.ieee.org/transportation/efficiency/mazdas-new-skyactivx-engine-gives-new-life-to-internal-combustion>
- [33] STOKLOSA, Alexander. Mazda's Gasoline Skyactiv-X SPCCI Engine Explained: To control its gasoline compression ignition engine, Mazda turns to spark plugs. *Car and Driver* [online]. 7 Sep 2017 [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: <https://www.caranddriver.com/news/a15339942/mazdas-gasoline-skyactiv-x-spcci-engine-explained/>
- [34] HERBICH, Richard. Mazda vylepšila motor Skyactiv-X. Má nový název, vyšší výkon a nižší spotřebu. *AutoRevue.cz* [online]. 1. 3. 2021 [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: <https://www.autorevue.cz/mazda-vylepsila-motor-skyactiv-x-ma-novy-nazev-vyssi-vykon-a-nizsi-spotrebu>
- [35] E-SKYACTIV X. Mazda.cz [online]. [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: <https://www.mazda.cz/o-nas/skyactiv-x/>

- [36] JÁNSKÝ, Martin. První dojmy: Benzinový motor Mazda e-Skyactiv X je technický zázrak. Garáž.cz [online]. 23. 4. 2021 [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: <https://www.garaz.cz/clanek/benzinovy-motor-mazda-e-skyactiv-x-je-technicky-zazrak-21006045>

**SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ**

ATAC	Active Thermo-Atmosphere Combustion
C	Uhlík
CAI	Controlled Auto-Ignition
CFI	Central Fuel Injection
CI	Compression Ignition
CO	Oxid uhelnatý
CO <sub>2</sub>	Oxid uhličitý
DME	Dimethylether
DÚ	Dolní úvrat'
EGR	Exhaust Gas Recirculation
EU	Evropská unie
GDI	Gasoline Direct Injection
H <sub>2</sub>	Vodík
H <sub>2</sub> O	Voda
HC	Uhlovodíky
HCCI	Homogeneous Charge Compression Ignition
HTHR	High Temperature Heat Realease
HÚ	Horní úvrat'
LTC	Low Temperature Combustion
LTHR	Low Temperature Heat Realease
MK	Modulated Kinetics
MPI	Multi Point Injection
MULDIC	Multiple stage Diesel Combustion
N <sub>2</sub>	Dusík
NADI	Narrow Angle Direct Injection
NO	Oxid dusnatý
NO <sub>2</sub>	Oxid dusičitý
NO <sub>x</sub>	Oxidy dusíku
NVO	Negative Valve Overlap
O <sub>2</sub>	Kyslík
OKP	Optimised Kinetic Process
PM	Particulate Matter

PREDIC		Premixed lean Diesel Combustion
PVO		Positive Valve Overlap
SI		Spark Ignition
SO <sub>2</sub>		Oxid siřičitý
SPCCI		Spark Controlled Compression Ignition
SPI		Single Point Injection
D	[mm]	Vrtání
V <sub>c</sub>	[cm <sup>3</sup> ]	Celkový objem
V <sub>k</sub>	[cm <sup>3</sup> ]	Kompresní objem
V <sub>z</sub>	[cm <sup>3</sup> ]	Zdvihový objem
Z	[mm]	Zdvih
ε	[–]	Kompresní poměr
λ	[–]	Součinitel přebytku vzduchu
φ	[–]	Součinitel ekvivalence